

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA MATEMATIKO IN FIZIKO

Dejan Žontar

**Razvoj pozicijsko občutljivih
silicijevih detektorjev
za spektrometer DELPHI**

Magistrsko delo

Ljubljana 1995

POVZETEK

V delu je opisan razvoj in testiranje pasovnih detektorjev za izboljšavo silicijevega detektorja pri eksperimentu DELPHI. Predstavljen je elektrostatski model, s katerim so bili izračunani prenosi signala z interpolacijskih pasov in podani rezultati meritev. Opisan je sistem za testiranje detektorjev s svetlobnim izvorom in podana analiza meritev v testnem žarku. Pri tem se še posebej posvetimo krajevni ločljivosti detektorjev.

Delo je bilo opravljeno pod mentorstvom Doc. dr. Danila Zavrtanika in dr. Vladimirja Cindra pri eksperimentu DELPHI v Evropskem laboratoriju za fiziko osnovnih delcev CERN v Ženevi. Delo je potekalo v okviru raziskovalnega programa Odseka za eksperimentalno fiziko osnovnih delcev Inštituta Jožef Stefan in Univerze v Ljubljani. Financiralo ga je Ministrstvo za znanost in tehnologijo Republike Slovenije.

Najprej se moram zahvaliti mentorju dr. Vladimirju Cindru za vso pomoč pri delu. Z obilico potrpljenja me je vpeljal v eksperimentalno delo pri razvoju detektorjev in me vedno znova presenetil z bleščečimi rešitvami v navidez brezupnih situacijah. Brez njegove pomoči to delo nedvomno ne bi bilo mogoče.

Zahvaljujem se mentorju Doc. dr. Danilu Zavrtaniku, ki je kljub številnim obveznostim pogosto našel čas za kritično spremljanje mojega dela.

Seveda ne smem spregledati dr. Bojana Boštjančiča, ki mi je predvsem na pričetku nudil obilico koristnih nasvetov. Neprecenljivi so bili tudi stiki s člani mikroverteks skupine v CERN-u, v katero me je vpeljal. Med njimi moram še posebej izpostaviti dr. Juan Jose Gómez-Cadenas, s katerim sem imel mnogo koristnih pogovorov o ločljivosti detektorjev cilindričnega dela.

Zahvaljujem se tudi Eriku Marganu, od katerega sem se naučil, da je tudi elektronika res lahko umetnost.

Zahvaliti se moram tudi Srečku Mačku, dr. Janezu Piršu, Silvi Pirš, in Jani Milivojević za ves trud, ki so ga vložili v izdelavo hibridnega vezja.

Nenazadnje se zahvaljujem tudi vsem sodelavcem odseka F9 za izjemno delovno vzdušje.

Kazalo

Uvod	1
1 Silicijevi pasovni detektorji	3
1.1 Osnove delovanja	3
1.2 Osnovna struktura	4
1.3 Opis spektrometra DELPHI	4
1.4 Zgradba obstoječega silicijevega detektorja	6
2 Izboljšava silicijevega detektorja pri eksperimentu DELPHI	7
2.1 Novi valjasti del	8
2.2 Obročasti del (VFT)	9
2.3 Pasovni detektorji obročastega dela	9
3 Geometrijske lastnosti detektorjev za obročasti del	13
3.1 Ločljivost in razmik med pasovi	13
3.2 Določanje razmika med pasovi	13
3.3 Določanje prenosov signala	14
3.3.1 Opis modela	14
3.3.2 Nastavitev prostih parametrov in test modela	16
3.3.3 Rezultati	17
4 Meritve v testnem žarku - detektorji cilindričnega dela	19
4.1 Testni žarek	19
4.2 Opis sistema	19

4.3	Uvrščanje referenčnih detektorjev	20
4.4	Določanje mesta zadetka	22
4.4.1	Algoritmi za majhne vpadne kote	24
4.4.2	Algoritmi za velike vpadne kote	25
4.5	Krajevna ločljivost v odvisnosti od vpadnega kota	31
4.6	Krajevna ločljivost v odvisnosti od razmerja signal/šum	33
5	Meritve v testnem žarku - detektorji obročastega dela	35
5.1	Opis sistema	35
5.2	Uvrščanje detektorjev in krajevna ločljivost	35
5.3	Prenos signala z interpolacijskih pasov	41
6	Testiranje detektorjev s svetlobnim izvorom	43
6.1	Izbira sistema	43
6.2	Opis sistema	43
6.2.1	Optični sistem	44
6.2.2	Čitalni sistem	45
6.2.3	Programska oprema	46
6.3	Rezultati	46
6.3.1	Testiranje detektorjev s svetlobo	46
6.3.2	Merjenje prenosa signala	49
6.3.3	Merjenje prenosa signala z izvorom Am^{241}	50
6.3.4	Rezultati testiranja	51
7	Zaključek	53
A	Krmilno vezje sistema za testiranje detektorjev s svetlobo	55
B	Določanje ničelnega nivoja in šuma	57

Uvod

Povečanje razpoložljive energije na trkalniku elektronov in pozitronov LEP v evropskem centeru za fiziko delcev CERN pri Ženevi z 91 GeV na 190 GeV odpira raziskavam v fiziki visokih energij nova energijska področja. Ker pa se bo energija pomaknila z vrha resonance Z^0 , se bo s tem zmanjšal presek za številne reakcije, ki potekajo preko nastanka nevtralnega šibkega bozona. Zato morajo razvoju pospeševalnikov slediti tudi izboljšave detektorjev, še posebej povečanje prostorskega kota, ki ga detektor pokriva. Pri detektorju DELPHI sta tako predlagani razširitev silicijevega verteks detektorja in izboljšava kalorimetra, ki pokriva majhne polarne kote. Pri izboljšavi silicijevega detektorja sodeluje tudi skupina z Inštituta Jožef Stefan. Predlagano magistrsko delo se ukvarja z načrtovanjem in testiranjem detektorjev obročastega dela silicijevega detektorja, ki bo pokrival najnižje polarne kote, ter z analizo ločljivosti detektorjev pri velikih vpadnih kotih.

Vpliv vpadnega kota ionizirajočega delca na krajevno ločljivost je pomemben pri podaljšanju cilindričnega dela detektorja. Ta bo podaljšan tako, da bo namesto do 45° pokrival polarne kote do 25° , kar predstavlja precejšnjo spremembo največjega vpadnega kota. Večja dolžina detektorjev pa bo poslabšala tudi razmerje signal/šum. Zato delo obravnava tudi vpliv razmerja signal/šum na krajevno ločljivost silicijevih detektorjev.

Za delce, ki lete v smeri naprej, je verjetnost za večkratno sipanje precej večja kot pri polarnih kotih blizu 90° . Tako silicijev detektor v smeri naprej ne bo služil kot verteks detektor ampak za natančno sledenje delcev pri nizkih polarnih kotih. Skupaj s števcem obročev Čerenkova (RICH) in večžičnimi proporcionalnimi komorami v smeri naprej bo precej pripomogel k ostalim metodam identifikacije, saj zagotavlja večjo hermetičnost detektorja za rekonstrukcijo sledi nabitih delcev [1, 2].

Za silicijev sledilec, ki pokriva nizke polarne kote, ni potrebna tako dobra ločljivost, kot jo pri silicijevih pasovnih detektorjih običajno dosegamo. Zato je bil potreben razvoj detektorjev, prilagojenih specifičnim zahtevam. Delo je obsegalo tako načrtovanje detek-

torjev in testiranje prototipov v testnem žarku, kot tudi proizvodnjo in testiranje končnih detektorjev s svetlobnim izvirom.

Načrtovanje detektorjev je obsegalo predvsem izbiro širine pasov in razmika med njimi. Lastnosti detektorjev pri različnih vrednostih teh parametrov sem ocenil s pomočjo elektrostatskega modela. Na osnovi napovedi modela smo izdelali prototipe detektorjev s tremi različnimi geometrijami, katerih lastnosti so se dobro ujemale z napovedmi.

Testiranje detektorjev lahko po namenu in izvedbi razdelimo na testiranje prototipov in na testiranje detektorjev za vgraditev v eksperiment.

Testiranje prototipov je pomembna stopnja pri razvoju detektorjev, v kateri preverjamo splošne lastnosti detektorjev v pogojih, čim bližjih končnim pogojem delovanja. Ker smo razvijali detektorje z novo geometrijo je bila ta stopnja še posebej pomembna. Pri testiranjih smo se še posebej osredotočili na prenose signalov z interpolacijskih pasov, ločljivost detektorjev in razmerje signal/šum. To je definirano za minimalno ionizirajoče delce pri pravokotnem vpadu, določili pa smo ga z meritvami v testnem žarku. Preveriti smo želeli tudi splošno obnašanje detektorjev in hibridnega vezja v pogojih, čim bolj podobnih resničnim pogojem delovanja. V tej fazi zadošča testiranje majhnega števila detektorjev.

Drugo področje je testiranje vseh detektorjev za vgraditev v eksperiment. To poteka v različnih fazah proizvodnje in je namenjeno kontroli kvalitete izdelave. Ker obsega testiranje velikega števila detektorjev mora biti hitro in čim bolj preprosto. Zato smo izdelali poseben sistem s svetlobnim izvorom, s katerim smo preverjali predvsem nivo šuma celotnega detektorja in posameznih kanalov ter iskali napake na čitalni elektroniki ali na posameznih pasovih.

1. Poglavje

Silicijevi pasovni detektorji

1.1 Osnove delovanja

Delovanje polprevodniških detektorjev temelji na tvorbi parov elektron-vrzel ob prehodu ionizirajočega delca skozi polprevodnik. V siliciju so energijske izgube minimalno ionizirajočega delca na enoto poti okrog $390 \text{ eV}/\mu\text{m}$, kar da ob potrebnih 3.6 eV za tvorbo para približno 110 parov na mikron poti. Ker električna polja, ki jih tvorimo v polprevodniških detektorjih, niso dovolj velika, da bi prišlo do pomnoževanja naboja, je signal odvisen le od debeline detektorja. Ta pa mora biti zaradi večkratnega sipanja čim manjša in kot kompromisna rešitev, ki še vedno da zadosten signal, se običajno uporablja debelina $300 \mu\text{m}$. Pri tej debelini je povprečen signal velik okrog trideset tisoč parov elektron-vrzel, kar z nizko-šumno elektroniko že lahko zaznamo.

Kljub zaznavnem signalu pa je pri normalnih pogojih v polprevodniških detektorjih ozadje mnogo večje od signala. V čistem siliciju je pri sobni temperaturi gostota prostih nosilcev naboja $n_i = 1.45 \times 10^{10}/\text{cm}^3$. V $300 \mu\text{m}$ debelem detektorju s površino 10 mm^2 je torej približno 4.5×10^7 prostih nosilcev naboja, kar je za tri rede velikosti več od ocenjenega signala. Zato je treba njihovo število zmanjšati. To lahko dosežemo z ohlajevanjem detektorja ali pa z osiromašenjem detektorja s pomočjo zaporne napetosti na $p-n$ stiku. Pri zadnji metodi električno polje povzroči prehajanje večinskih nosilcev naboja z ene strani $p-n$ stika na drugo, kjer se rekombinirajo. Nastane področje z zelo majhno gostoto prostih nosilcev naboja, v katerem je prisotno električno polje.

Pri prehodu ionizirajočega delca skozi detektor naboj, ki nastane znotraj osiromašenega področja, pod vplivom električnega polja odteče do elektrode na površini detektorja, kjer ga zaznamo. Naboj, ki ni nastal v osiromašenem področju, pa se rekombinira s

prostimi nosilci in k signalu ne prispeva. Zato je delovanje detektorja najbolj učinkovito, ce je osiromašeno področje razširjeno čez ves detektor. Podrobnejši opis delovanja in zgradbe silicijevih detektorjev je podan npr. v [3].

1.2 Osnovna struktura

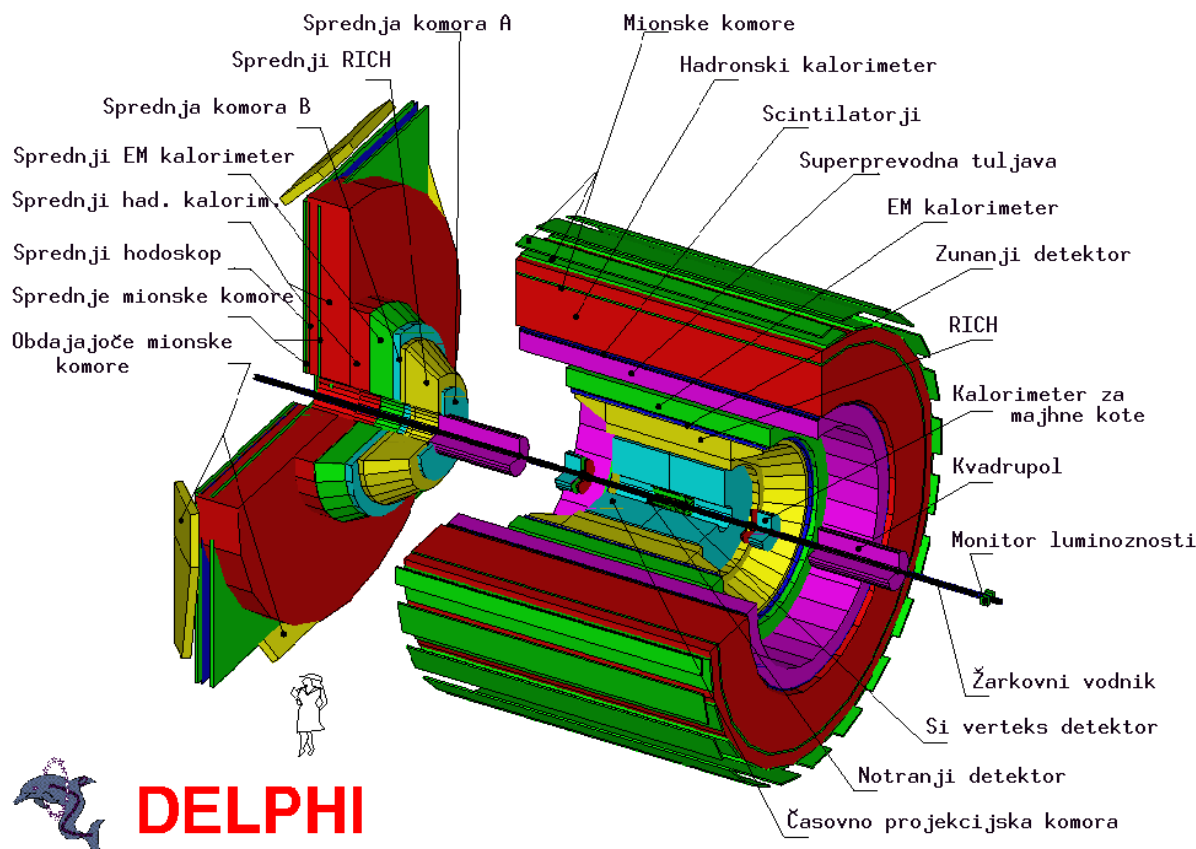
Če naj bo detektor pozicijsko občutljiv ne sme delovati kot ena sama dioda, ampak mora biti razdeljen na več diod. To pomeni, da detektor strani p ne sme imeti dopirane po celotni površini ampak v obliki ustreznega vzorca. Pri tem se uporabljata predvsem dve geometriji. Ena je polje majhnih pravokotnikov, ki delujejo kot posamezne diode in tako dajo informacije o x in y koordinati prehoda (zrnati detektorji). Vendar je tehnologija izdelave tovrstnih detektorjev še v razvoju, pri čemer je zaradi velike gostote izhodnih kanalov ena glavnih težav povezava detektorja s čitalno elektroniko. Zato se običajno uporabljajo detektorji z vrstami vzporednih močno p dopiranih (p^+) pasov, ki sicer dajo podatke le o eni koordinati, omogočajo pa preprostejše branje.

1.3 Opis spektrometra DELPHI

Spektrometer DELPHI (slika 1.1) je eden od štirih detektorjev na trkalniku LEP v evropskem centru za fiziko delcev CERN pri Ženevi. Zgrajen je bil kot večnamenski detektor s poudarkom na identifikaciji delcev (detektor RICH) in natančnem določanju sledi delcev blizu primarnega verteksa. Ta omogoča rekonstrukcijo mesta razpada kratkoživih stanj z ločljivostjo nekaj $10\ \mu\text{m}$.

Okoli centralnega dela detektorja, kjer prihaja do trkov elektronov s pozitroni, so cilindrično nameščeni polprevodniški verteks detektor, komore za merjenje sledi nabitih delcev (ID, TPC, OD), detektor za identifikacijo delcev RICH in elektromagnetni kalorimeter. Obdaja jih superprevodna tuljava s premerom 5.2 m, ki ustvarja homogeno magnetno polje z gostoto 1.2 T. Izven tuljave so nameščeni še števcji časa preleta, hadronski kalorimeter in mionske komore. Na obeh koncih valja je pokrov s podobno strukturo detektorjev. Z njimi detektiramo delce, ki letijo pod majhnimi polarnimi koti. Verteks detektor v pokrov ni vgrajen, tako da je pokritost prostorskega kota s tem detektorjem približno 70%.

Na svoji poti skozi detektor nabit delec ustvarja ionske pare. Poleg polprevodniških števcjev v verteks detektorju, so v ostale detektorje za merjenje sledi nabitih delcev vgra-



Slika 1.1: Shematski prikaz spektrometra DELPHI.

jene potovalne komore in deloma proporcionalni števeci v notranjem detektorju. Detektor za identifikacijo delcev RICH pa zaznava Čerenkovo svetlobo, ki jo delec seva pri prehodu skozi sevalec. Vendar potrebuje za učinkovito delovanje podatke o položaju in gibalni količini delcev ob prehodu skozi sevalec. Te dobi iz meritev sledi v prednjih komorah A in B, po načrtovani izboljšavi pa tudi iz obročastega dela silicijevega detektorja.

Nevtralni delci pustijo signal samo v kalorimetru, kjer oddajo vso svojo energijo, pri tem pa ustvarijo plaz ionskih parov. Število ionskih parov je sorazmerno energiji delca, iz porazdelitve plaz pa lahko nevtralnemu delcu določimo smer, vendar je napaka mnogo večja kot za nabite delce. Mioni se v kalorimetru ne ustavijo, zato kot edini delci pustijo signal v mionskih komorah na skrajnem zunanjem delu detektorja.

Za proženje čitalnega sistema in merjenje časa preleta se uporabljajo hitri scintilacijski števeci. Čitalni sistemi so nameščeni na obeh koncih valja, saj mora zaradi večkratnega sipanja aktivni del spektrometra vsebovati čim manj materiala.

1.4 Zgradba obstoječega silicijevega detektorja

Obstoječi silicijev pasovni detektor je valjaste oblike in se nahaja v sredini detektorja DELPHI tik ob žarkovni cevi (slika 1.1). Sestavljen je iz treh plasti detektorjev, na radijih 6.3, 9 in 11 cm in pokriva polarni kot do 45° . Notranja in zunanja plast sta sestavljeni iz dvostranskih detektorjev, srednja pa iz enostranskih. Na vseh detektorjih je razmik med pasovi na strani p enak $50\ \mu\text{m}$, med čitalnimi pasovi pa se nahaja po en interpolacijski pas. Pasovi so vzporedni z osjo detektorja in merijo $r\phi$ koordinato preleta.

Notranja plast je sestavljena iz modulov dolžine $2 \times 14\ \text{cm}$. Detektorji so segmentirani tako na strani p kot na strani n (t.i. dvostranski Si detektorji), tako da je mogoče določanje $r\phi$ in z koordinate. Branje z koordinate na koncih detektorja je omogočeno z dvojno metalizacijo strani n ¹. Na strani n razmik med pasovi narašča s padajočim polarnim kotom. Razmik med prvimi 768 pasovi (90° do 59°) je $49.5\ \mu\text{m}$, med naslednjimi 384 (59° do 39°) je $99\ \mu\text{m}$ in med zadnjimi 384 (59° do 25°) $150\ \mu\text{m}$. S tem zmanjšamo število pasov, na katere je porazdeljen signal in tako izboljšamo ločljivost (glej poglavje 4.5).

Srednja plast je sestavljena iz enostranskih detektorjev dolžine $2 \times 11.8\ \text{cm}$ in pokriva polarni kot do 38° .

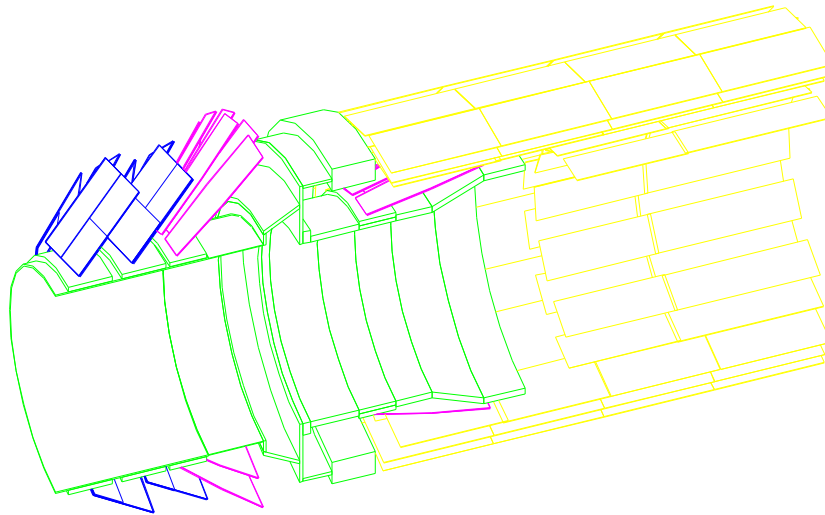
Zunanja plast je sestavljena iz modulov dolžine $2 \times 11.35\ \text{cm}$. Na strani n se v srednjem delu nahaja 1280 pasov v razmiku $42\ \mu\text{m}$, sledi pa jim 640 pasov v razmiku $84\ \mu\text{m}$.

¹Različne strukture Si pasovnih detektorjev so opisane npr. v [3].

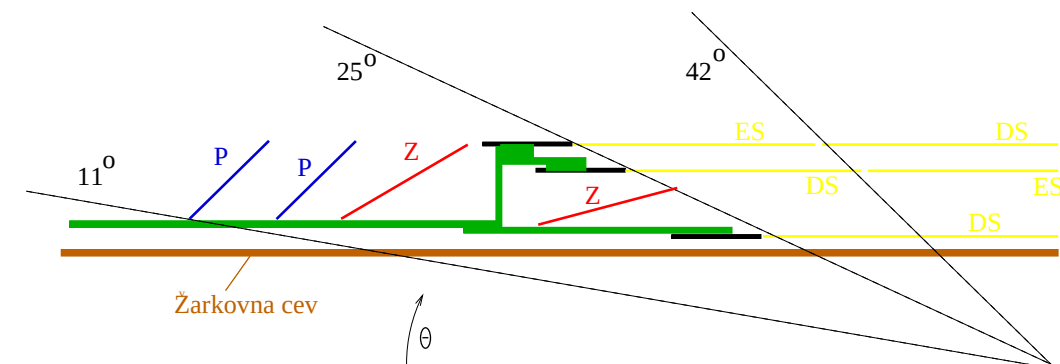
2. Poglavje

Izboljšava silicijevega detektorja pri eksperimentu DELPHI

Razširitev silicijevega detektorja pri eksperimentu DELPHI zajema podaljšanje valjastega verteks detektorja in izgradnjo sledilca v smeri naprej (very forward tracker - VFT), ki bo obročaste oblike.



Slika 2.1: Shematski prikaz silicijevega detektorja. Z rumeno so prikazani detektorji valjastega dela, z rdečo zrnati in z modro pasovni detektorji obročastega dela. Z zeleno je prikazano nosilno ogrodje.



Slika 2.2: Presek novega silicijevega detektorja. Sestavljen je iz cilindričnega dela, ki pokriva polarni kot do 25° , kateremu sledi obročasti del (do 11°). Z **DS** so označeni dvostranski in z **ES** enostranski detektorji valjastega dela, s **P** pasovni detektorji in z **Z** zrnati detektorji obročastega dela.

2.1 Novi valjasti del

Obstoječi silicijev detektor bo z dodajanjem novih detektorskih ploščic podaljšan tako, da bo namesto do sedanjih 45° pokrival področje do 25° polarnega kota. Drugi detektor (VFT) bo postavljen obročasto okoli žarkovne cevi in bo pokrival polarne kote od 25° do 11° (sliki 2.1, 2.2).

Notranja plast valjastega dela detektorja bo ostala nespremenjena.

Srednja plast bo nadomeščena z novimi detektorji. Moduli bodo sestavljeni iz enostranskih in dvostranskih detektorjev. Enostranski detektorji bodo pokrivali polarni kot $90^\circ - 42.5^\circ$. Sledili bodo dvostranski detektorji s $100 \mu\text{m}$ razmikom med pasovi na strani n , ki bodo pokrivali polarni kot do 25° .

Zunanja plast bo komplementarna drugi plasti. To pomeni, da bodo dvostranski detektorji pokrivali polarni kot od 90° do 42° in enostranski do 25° . Kot dvostranski detektorji bodo uporabljeni obstoječi dvostranski detektorji zunanje plasti. Tako bo na strani n razmik med pasovi enak $42 \mu\text{m}$ za polovico bliže 90° in $84 \mu\text{m}$ za oddaljeni del.

Celoten valjasti del detektorja bo tako omogočal tri meritve $r\phi$ in dve meritvi z koordinate na območju polarnih kotov 90° do 25° .

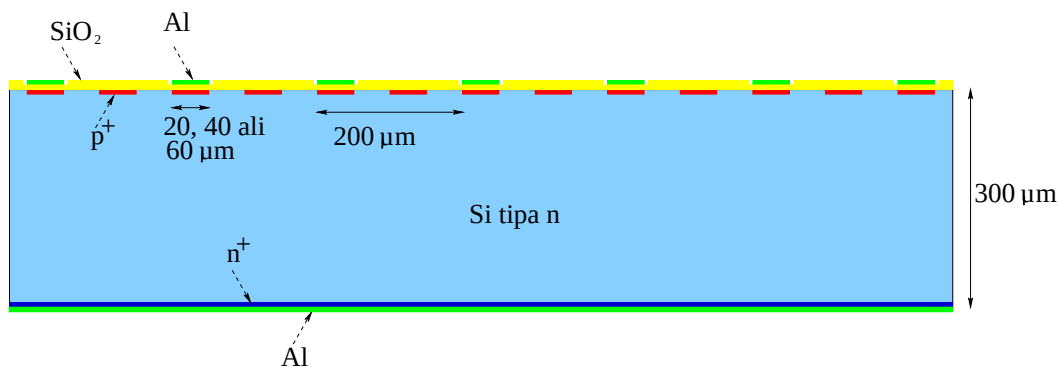
2.2 Obročasti del (VFT)

Obročasti del detektorja bo sestavljen iz štirih zaporednih nagnjenih obročev (sliki 2.1, 2.2). Prva dva obroča bosta sestavljena iz zrnatih detektorjev, druga dva iz pasovnih detektorjev. Zrnati detektorji bodo sestavljeni iz detektorskih ploščic dimenzij 23×68 mm, z zrni kvadratne oblike s stranico $330 \mu\text{m}$. Na detektorske ploščice bodo prilepljeni čitalni čipi. Ti so zasnovani tako, da bodo posredovali le koordinate zadetega zrna ne pa tudi višine signala.

Pasovni del je sestavljen iz dveh plasti po 12 modulov, ki so nagnjeni pod kotom 50° glede na os detektorja. Modul imenujemo sklop dveh enostranskih detektorjev s pasovi prvega pravokotnimi na pasove drugega, zlepljenih s hrbtnima stranema. Tako podobno kot pri dvostranskih detektorjih dosežemo določevanje obeh koordinat preleta nabitega delca. Prednost take zgradbe je v preprostejši izdelavi, slabost pa večja debelina detektorja in torej večja verjetnost za večkratno sipanje.

Detektorji so kvadratne oblike s stranico 53 mm. Vsebujejo 511 vzporednih pasov širine $60 \mu\text{m}$ v razmiku $198 \mu\text{m}$. Pasovi tečejo pod kotom 2° glede na rob detektorja, tako da s sukanjem modulov dosežemo kot 4° med pasovi prve in druge plasti. S tem zmanjšamo število kombinatoričnih možnosti pri več zadetkih. Kot na strani p detektorjev valjastega dela je s čitalno elektroniko povezan le vsak drugi pas. Taka geometrijo da ob enakem številu izhodnih kanalov precej boljšo krajevno ločljivost (glej 3. poglavje).

2.3 Pasovni detektorji obročastega dela



Slika 2.3: Shematski prikaz detektorja obročastega dela.

Shematski prerez silicijevega detektorja za obročasti del je prikazan na sliki 2.3. Osnova je silicijev kristal tipa n debeline $300 \mu\text{m}$. Na spodnj strani je dopiranje močnejše,

s čimer dosežemo boljši stik z virom deplecijske napetosti in osiromašenemu področju preprečujemo doseg do površine. Na zgornji strani se v $100\ \mu\text{m}$ razmiku nahajajo močno dopirani pasovi tipa p širine $20\ \mu\text{m}$, $40\ \mu\text{m}$ ali $60\ \mu\text{m}$. Celotna zgornja plast je prevlečena s silicijevim oksidom (SiO_2). Čitalni pasovi so dodatno prevlečeni z aluminijem. Ker je vhod čitalnega čipa povezan z Al prevleko deluje struktura p^+ pas - SiO_2 - Al prevleka kot sklopitveni kondenzator s kapaciteto reda velikosti $100\ \text{pF/cm}$ (odvisna od debeline pasu). Sklopitev s čitalnim sistemom je torej precej večja kot z ostalimi sosedmi (reda velikosti $1\ \text{pF/cm}$), kar omogoča učinkovit prenos signala na čitalno elektroniko.

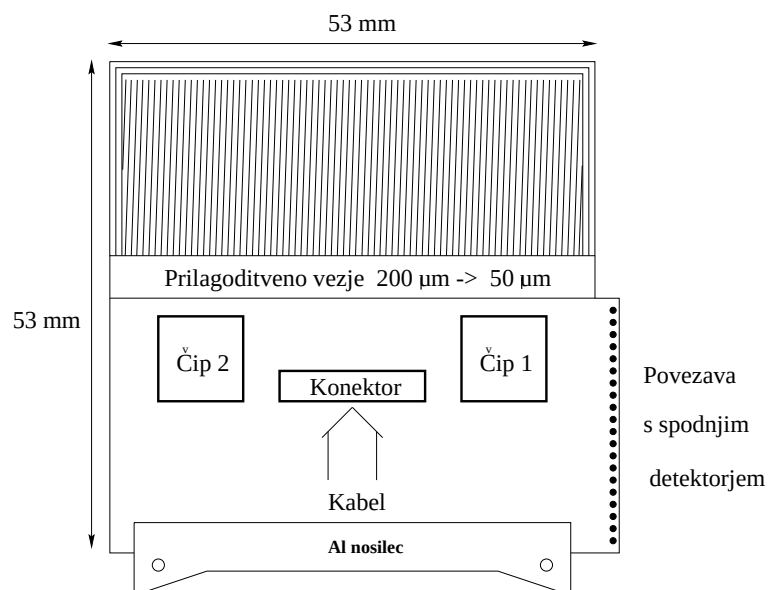
Zaporno napetost na detektorju dosežemo tako, da na spodnjo (n^+) stran vodimo pozitivno napetost (okoli 50V), p^+ pasove pa preko velikega upornika ozemljimo. Povezava z ozemljitveno linijo poteka preko tranzistorjev FET, s katerimi dosežemo upornost nad $30\ \text{M}\Omega$.

Celotna struktura detektorja je obdana z zaščitnim obročem. To je p^+ obroč na zgornji strani detektorja, ki se nahaja blizu roba detektorja. Tudi ta je ozemljen in je namenjen zbiranju površinskega toka, ki se pojavi na robu detektorja. Ta je zaradi površinskih pojavov precej večji od mrtvega toka, ki se pojavi v depletiranem področju, tako da bi bistveno poslabšal karakteristike detektorja.

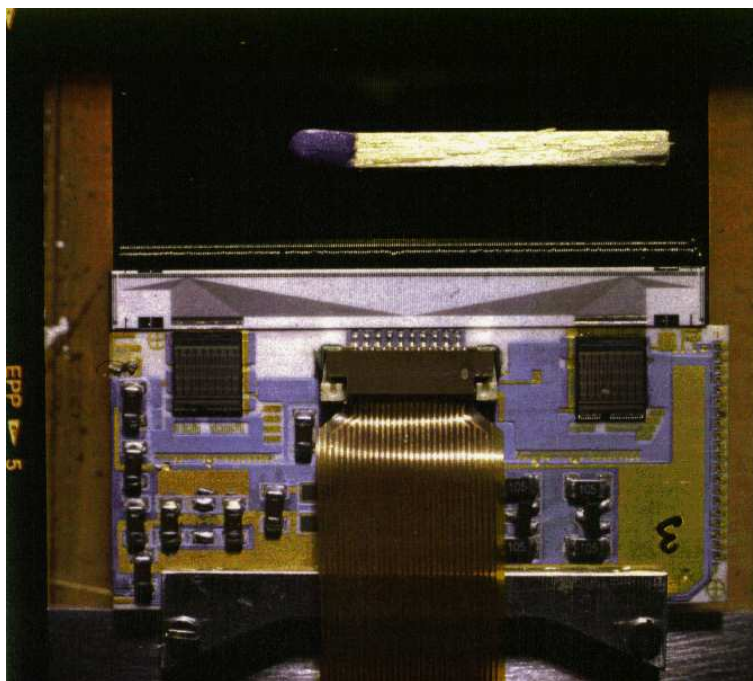
Vsak detektor je opremljen s hibridnim vezjem za napajanje in branje detektorja, ki je zaradi pomanjkanja prostora prilepljeno na detektor (sliki 2.4 in 2.5). Vezje je izdelano v kombinaciji debeloplastne in tankoplastne tehnologije na Odseku za keramiko in v Naravoslovno-tehnološkem centru Inštituta Jožef Stefan. Osnova za hibridno vezje je $500\ \mu\text{m}$ debela podlaga iz berilijevega oksida (BeO). Berilijev oksid smo kljub zahtevnejši obdelavi izbrali zaradi dobre toplotne prevodnosti ($250\ \text{W/Km}$) in velike radiacijske dolžine ($15.4\ \text{cm}$).

Poleg linij za krmiljenje čipov je na hibridu še prilagoditveno vezje, ki $198\ \mu\text{m}$ razmik med pasovi na detektorju prevede na $49.5\ \mu\text{m}$ razmik med vhodnimi kanali čitalnega čipa. Tudi to je izdelano v Naravoslovno-tehnološkem centru, z litografsko obdelavo $0.5\text{--}1\ \mu\text{m}$ debele Al plasti na približno $300\ \text{nm}$ debeli Cr podlagi, napršeni na $200\ \mu\text{m}$ debelem steklu. Povezava pasov, prilagoditvenega vezja in čipa ter čipov s hibridnim vezjem je narejena z bondirno tehniko.

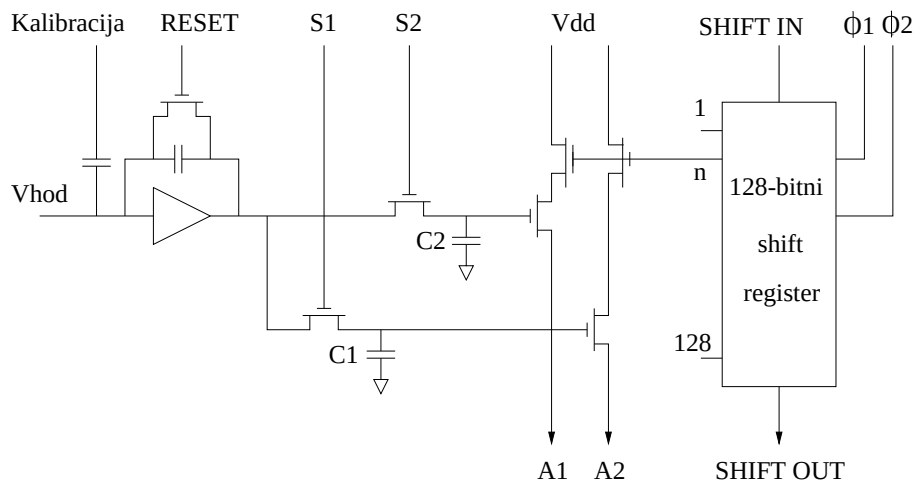
Hibridno vezje je prilepljeno na zgornjo stran detektorja tako, da je rob prilagoditvenega vezja pravokoten na pasove. Hibrid "zgornjega" detektorja v modulu je opremljen s konektorjem in aluminijastim nastavkom za pritrditev detektorja na ogrodje. Električna povezava s hibridom "spodnjega" detektorja je dosežena s kontakti na robu hibrida, s



Slika 2.4: Shematski prikaz detektorja obročastega dela.



Slika 2.5: Slika detektorja obročastega dela.



Slika 2.6: Shematski prikaz vhodnega kanala čipa MX6.

krmilno kartico pa je modul povezan s kaptonskim kablom.

Za branje signala je hibrid opremljen z dvema čipoma MX6 s po 128 vhodnimi kanali. Vsak kanal (slika 2.6) je opremljen z nabožno občutljivim ojačevalcem in dvema kondenzatorjema. V kondenzatorja se shrani signal pred prehodom delca (signal S1) in po njem (signal S2). Tako odštejemo morebitne motnje, inducirane pred signalom.

Branje čipa sprožimo s startnim signalom (SHIFT-IN) in krmilimo z urnim signalom ($\Phi 1$, $\Phi 2$). Ta zaporedno sproži branje vrednosti vseh 128 kanaliv (multiplexing). Ob koncu branja čip odda signal (SHIFT-OUT), ki sproži enak cikel pri naslednjem čipu. To omogoča zaporedno branje signala z vseh štirih čipov modula in zmanjša število izhodnih linij z 2×512 na 2. Delovanje čipa je natančneje opisano v [8].

Zaradi tako zasnovanega krmiljenja bralnega cikla je sistem zelo občutljiv na prenos digitalnih signalov RESET in S1 na detektor, saj signala vodimo na začetku in med zbiranjem naboja. Da bi zmanjšali sklopitev med detektorjem in ustreznima linijama na hibridnem vezju, ta signala do čipov pripeljemo po posebnih kaptonskih linijah, ki se nahajajo nad plastjo na stalnem potencialu.

3. Poglavje

Geometrijske lastnosti detektorjev za obročasti del

3.1 Ločljivost in razmik med pasovi

Zaradi večkratnega sipanja za sledenje delcev, ki lete v smeri naprej, zadoščajo že detektorji s krajevno ločljivostjo okoli $70\ \mu\text{m}$ [1, 2]. Silicijevi pasovni detektorji, ki se običajno uporabljajo, imajo razmik med čitalnimi pasovi $50\ \mu\text{m}$ in tipično dosežejo krajevno ločljivost med 5 in $10\ \mu\text{m}$. Zato pričakujemo, da lahko zahtevano ločljivost $70\ \mu\text{m}$ dosežemo že s precej večjim razmikom med čitalnimi pasovi. S tem lahko bistveno zmanjšamo število izhodnih kanalov in s tem stroške.

Pri danem razmiku med pasovi pa lahko število izhodnih kanalov zmanjšamo tudi z interpolacijskimi pasovi. Ti so podobni čitalnim, le da s čitalno elektroniko niso povezani neposredno ampak preko kapacitivne sklopitve s čitalnimi pasovi. Največji del signala se prenese na najbližja soseda, del pa se inducira na bolj oddaljenih pasovih in na zadnji strani detektorja. Vendar je običajno zaznaven le signal zbran na najbližjih sosedih, na bolj oddaljenih pa signal običajno ne presega nivoja šuma.

3.2 Določanje razmika med pasovi

Zgornjo mejo za razmik med pasovi lahko določimo iz zahteve, da mora biti ločljivost detektorjev vsaj $70\ \mu\text{m}$. Ker se zaradi difuzije pri potovanju proti pasovom naboj razširi le na okoli $10\ \mu\text{m}$ pri tako velikem razmiku pričakujemo, da bo večina naboja zbrana le na enem pasu. Tako lahko ločljivost ocenimo s predpostavko, da je signal porazdeljen

diskretno

$$\sigma = \frac{d}{\sqrt{12}}, \quad (3.1)$$

kjer je d razmik med pasovi. Iz zahteve $\sigma \leq 70 \mu\text{m}$ sledi, da razmik med pasovi ne sme preseči $240 \mu\text{m}$. Druga omejitvena faktorja pri določanju razmika sta širina detektorjev (53 mm) in zahteva, da je število izhodnih kanalov večkratnik 128 (število vhodnih kanalov čipa MX6).

Preprost račun pokaže, da lahko zahtevam zadostimo že z enim čitalnim čipom (128 čitalnih pasov v razmiku $400 \mu\text{m}$) in vsaj enim interpolacijskim pasom med njimi. Elektrostatski račun, ki ga bom opisal kasneje, za to geometrijo in za pasove širine $20 \mu\text{m}$ napoveduje le okoli 40% prenos signala z interpolacijskih na čitalne pasove. Druga možnost sta dva čitalna čipa brez interpolacijskih pasov. Vendar sta ti rešitvi preveč tvegani, saj sta ravno na meji zahtevanega, tako da ju pri načrtovanju detektorja nismo obravnavali. Izbirali smo med naslednjima, varnejšima možnostima. Pri prvi je detektor še vedno opremljen le z dvema čitalnima čipoma, med čitalnimi pasovi pa se nahaja vsaj po en interpolacijski pas. Pri drugi je detektor opremljen s tremi čitalnimi čipi, tako da razmik med čitalnimi pasovi približno $130 \mu\text{m}$. Bolj privlačna je seveda možnost z dvema čipoma, saj bistveno zmanjša število izhodnih kanalov. Vprašanje pa je, ali se z interpolacijskega pasu prenese na sosednja čitalna pasova dovolj signala. Poleg tega s širino pasu narašča tudi njihova kapaciteta, kar prispeva k šumu predojačevalca. Ta za čip MX6, ki ga uporabljamo, narašča kot

$$ENC = 350 e^- + 15 e^- / pF \times C[pF], \quad (3.2)$$

kjer je ENC šum, izražen v ekvivalentnem številu osnovnih nabojev.

3.3 Določanje prenosov signala

Delež signala, ki se z interpolacijskega pasu prenese na sosednja čitalna pasova je odvisen od razmika med pasovi, njihove širine in števila interpolacijskih pasov. Za različne geometrije detektorja smo ga ocenili z elektrostatskim modelom, opisanem v [4].

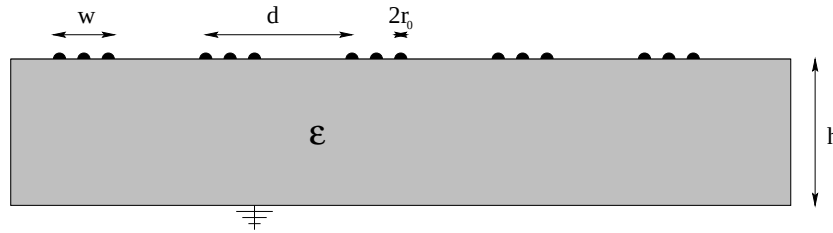
3.3.1 Opis modela

Ker je dolžina detektorjev (nekaj cm) običajno precej večja od razmika med pasovi in debeline detektorja ($\approx 300 \mu\text{m}$), je za obravnavo detektorja uporaben dvodimenzionalni model. V približku vsak pas nadomestimo z več tankimi vzporednimi žicami na enakem

potencialu. Rezultati, predstavljeni v članku [4] kažejo, da v primeru, ko sta širina in razmik med pasovi majhna v primerjavi z debelino detektorja, računi z naraščajočim številom žic zelo hitro konvergirajo in se dobro ujemajo z meritvami.

Elektrostatski račun, na katerem temelji opisani model, lahko opravičimo s tipičnimi časi za model pomembnih dogajanj. Tako sta čas zbiranja naboja v silicijevem detektorju (reda velikosti 10 ns) in tipična časovna konstanta ojačevalca (reda velikosti 100 ns) majhna v primerjavi s tipično časovno konstanto, s katero naboj odteka z interpolacijskega pasu (reda velikosti 1 ms). Upoštevamo tudi, da je vhodna kapaciteta nabojno občutljivega ojačevalca (nekaj 100 pF) mnogo večja od kapacitete med pasovi (okoli 1 pF).

Geometrija sistema je predstavljena na sliki 3.1. Vsak pas širine w je nadomeščen z



Slika 3.1: Shema detektorja v elektrostatskem modelu. Vsak pas nadomeščen s skupino enakomerno razmaknjenih žic z radijem r_0 .

n žicami polmera r_0 , enakomerno razporejenih po širini pasu. Razmik med pasovi je enak d , razdalja do zadnje strani (debeline detektorja) pa je h . Če je zadnja stran na ničelnem potencialu, v približku tankih žic naboj q_j na j -ti žici inducira na i -ti žici potencial

$$\Phi_{ij} = \frac{q_j}{2\pi\epsilon_o\epsilon_r} \ln\left[\frac{r_{ij}}{\sqrt{r_{ij}^2 + 4h^2}}\right] = C_{ij} q_j, \quad i \neq j \quad (3.3)$$

$$\Phi_{ii} = \frac{q_i}{2\pi\epsilon_o\epsilon_r} \ln\left[\frac{r_0}{2h}\right] = C_{ii} q_i, \quad (3.4)$$

kjer je r_{ij} razdalja med i -to in j -to žico. Ker se pasovi nahajajo na meji med silicijem z $\epsilon_{Si} = 11.1$ in zrakom, za ϵ_r vzamemo vrednost $\epsilon_r = \frac{1}{2}(\epsilon_{Si} + 1)$.

Računanje prenosa signala na čitalne pasove in kapacitet tako lahko prevedemo na reševanje sistema enačb

$$V_i = \sum_j \Phi_{ij} = \sum_j (C_{ij})^{-1} q_j = V^k, \quad i \in k \quad (3.5)$$

$$\sum_{j \in k} q_j = q^k. \quad (3.6)$$

Enačba (3.5) podaja potencial na i -ti žici kot vsoto prispevkov vseh žic. Koeficienti $(C_{ij}^w)^{-1}$ so pri tem podani z enačbama (3.3, 3.4). V enačbi smo zahtevali, da so vse žice, ki pripadajo istemu pasu (k), na enakem potencialu V^k . Enačba (3.6) pa izraža naboj, zbran na k -tem pasu, kot vsoto nabojev, zbranih na žicah s katerimi je pas nadomeščen.

Robni pogoji za izračun prenosa signala se razlikujejo od robnih pogojev za izračun kapacitet.

- Pri računanju prenosa signala z interpolacijskega pasu so robni pogoji
 - $q^k = Q_0$ za interpolacijski pas, na katerem se je zbral naboj
 - $q^j = 0$ za ostale interpolacijske pasove
 - $V^i = 0$ za čitalne pasove
- Pri računu kapacitet pasov pa
 - $V^k = V_0$ za čitalni pas k
 - $V^i = 0$ za ostale čitalne pasove
 - $q^j = 0$ za interpolacijske pasove

V obeh primerih so neznane količine naboji, inducirani na čitalnih pasovih in potenciali interpolacijskih pasov. Prenos signala določimo iz razmerja naboja, inducirane na najbližjih čitalnih pasovih in naboja, zbranega na interpolacijskem pasu (Q_0). Celotno kapaciteto pasu določimo kot razmerje med nabojem in potencialom izbranega (k -tega) pasu (V_0), pri kapaciteti proti ostalim pasovom gledamo naboj, induciran na ostalih čitalnih pasovih, kapaciteta proti zadnji strani pa je njuna razlika.

Za reševanje sistema linearnih enačb sem uporabil rutino *DEQINV* iz CERN-ove knjižnice *CERNLIB* [5].

3.3.2 Nastavitev prostih parametrov in test modela

V modelu poleg geometrijskih nastopata še dva prosta parametra. To sta število žic n , s katerimi nadomestimo pas, in radij žic r_0 . Izkaže se, da rezultati precej hitro konvergirajo z naraščajočim n in sicer je razlika med $n = 5$ in $n = 25$ pod 2%. Ker čas, potreben za reševanje sistema, zelo hitro narašča z n , je smiselna izbira $n = 5$. Radij žic oziroma brezdimenzijsko razmerje med radijem žice in razdaljo med sosednjima žicama (ρ) pa določimo s primerjavo rezultatov modela in meritev prenosov signalov [4]. Čeprav je model izpeljan v približku tankih žic, dobimo najboljše ujemanje v primeru, ko se žice med seboj dotikajo ($\rho = 1$). Pri tej izbiri se računi z izmerjenimi rezultati dobro ujemajo (razlika pod 2%), če je razdalja med pasovi velika v primerjavi s širino pasu. Če pa

je razmik med pasovi primerljiv z njihovo širino, da model do 10% premajhne prenose signalov.

V simulacijo seveda ni mogoče vključiti vseh pasov (celotne širine detektorja), saj bi reševanje sistema trajalo predolgo. Omejimo se na 15 čitalnih pasov, ki zagotavljajo relativno dobro konvergenco (pod 10^{-4} razlike v prenosu signala in pod 3% v kapaciteti v primerjavi z računom s 30 čitalnimi pasovi).

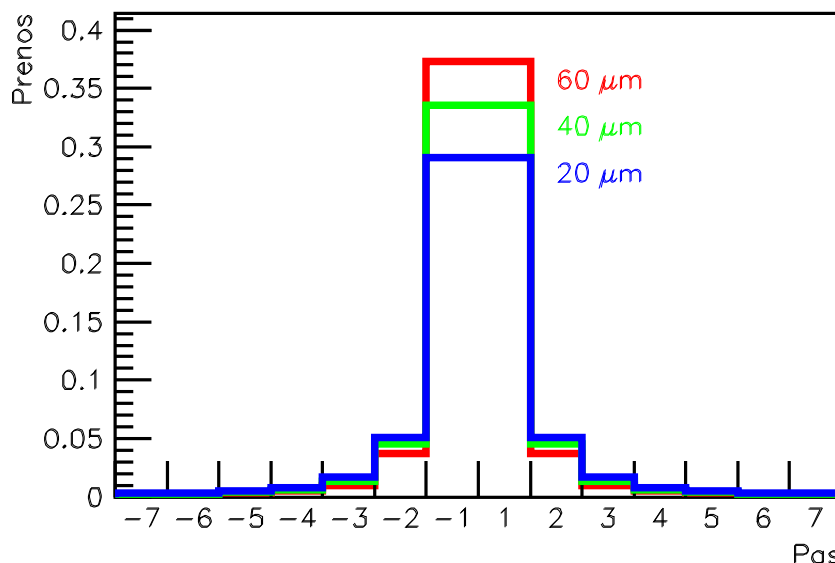
Pri preverjanju uporabnosti modela za račun kapacitet sem rezultate primerjal s podatki, zbranimi v [6] in [7]. Primerjave so pokazale, da je model za določanje kapacitet manj uporaben, saj se napovedi ujemajo z meritvami in ostalimi modeli le v okviru 20%. Ker pa nas kapacitete zanimajo predvsem zaradi njihovega prispevka k šumu, navedena natančnost zadošča.

3.3.3 Rezultati

Rezultati računov za geomerijo z dvema in s tremi čitalnimi čipi, za različni število interpolacijskih pasov in različne širine pasov so navedeni v tabeli 3.1. Izračunana višina signala, inducirana na oddaljenih sosedih za detektor z enim interpolacijskim pasom in $200\ \mu\text{m}$ med čitalnimi pasovi je prikazana na sliki 3.2. Računi kažejo, da se na bolj oddaljene sosedne prenese pod 5% signala. Pri detektorjih, ki imajo pri zadetkih čitalnega pasu razmerje signal/šum okoli 30:1 to pomeni, da signala na bolj oddaljenih sosedih ni več mogoče ločiti od šuma.

št. interp. pasov	razmik med čitalnimi pasovi	133 μm			200 μm				
	širina pasov	10 μm	20 μm	40 μm	10 μm	20 μm	40 μm	60 μm	80 μm
0	Kap. [pF/cm]	0.80	0.96	1.24	0.74	0.88	1.09	1.27	1.46
1	Signal	0.58	0.66	0.77	0.52	0.58	0.67	0.75	0.82
	Kap. [pF/cm]	0.80	0.96	1.33	0.74	0.88	1.11	1.36	1.76
2	Signal	0.60	0.69	/	0.54	0.61	0.71	/	/
	Kap. [pF/cm]	0.80	1.00	/	0.74	0.89	1.16	/	/
3	Signal	0.59	0.68	/	0.52	0.59	0.73	/	/
	Kap. [pF/cm]	0.81	1.03	/	0.75	0.90	1.28	/	/
	Kap. proti zad. strani [pF/cm]	0.27	0.28	0.29	0.35	0.37	0.40	0.42	0.43

Tabela 3.1: Prenosi signala z interpolacijskega pasu na najbližja soseda in kapacitete čitalnih pasov proti zadnji strani in proti celotnemu detektorju za različne geometrije detektorja.



Slika 3.2: Višina signala, inducirana na oddaljenih sosedih, za detektor z enim interpolacijskim pasom. Razmik med čitalnimi pasovi je 200 μm , širina pasov pa 20 μm , 40 μm in 60 μm .

Iz izračunanih kapacitet (tabela 3.1) in enačbe (3.2) vidimo, da kapaciteta pasov pri obravnavanih geometrijah in dolžini 52 mm k šumu prispeva le 50–100 e^- . To je ob celotnem šumu okrog 700 e^- sprejemljiv prispevek in nas pri izbiranju geometrije detektorja ne omejuje.

Iz tabele 3.1 vidimo, da model pri 200 μm razmiku med čitalnimi pasovi in ob enem interpolacijskem pasu napoveduje 50%, 67% in 75% prenos signala za pasove širine 20 μm , 40 μm in 60 μm . Ob dovolj visokem razmerju signal/šum ti prenosi signala zadoščajo, tako da smo za prototip izbrali opisano geometrijo s pasovi širine 20 μm in 40 μm . Zaradi zahtevnejše izdelave kljub večjemu prenosu signala nismo testirali pasov s širino 60 μm . Rezultati meritev v testnem žarku so se zelo dobro ujemali z napovedmi modela (50% za pasove širine 20 μm in 64% za 40 μm).

Pri testiranju prototipov kljub veliki širni pasov nismo opazili večjega števila napak, poleg tega pa smo za izdelavo končnih detektorjev izbrali zaneslivejšega proizvajalca¹. Ker so se tudi napovedi modela dobro ujemale z meritvami na pasovih širine 20 μm in 40 μm smo za končne detektorje izbrali pasove širine 60 μm , za katere smo pričakovali večji prenos (okoli 75% - tabela 3.1). V testnem žarku smo izmerili 79% prenos signala z interpolacijskih pasov.

¹Prototipe detektorjev (pasovi širine 20 in 40 μm) so izdelali v podjetju Tesla (Češka republika), končne detektorje (pasovi širine 60 μm) pa v Micron (Anglija).

4. Poglavje

Meritve v testnem žarku - detektorji cilindričnega dela

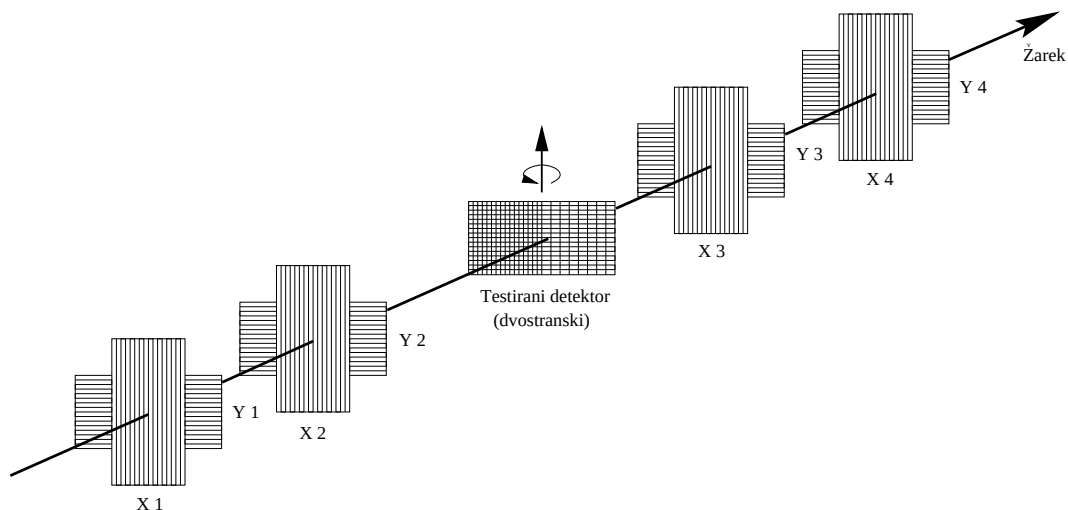
4.1 Testni žarek

Resničnim pogojem delovanja, ki bi si jih želeli pri testiranju prototipov, se najbolj približamo v testnih žarkih. To so izhodne linije velikih pospeševalnikov, namenjene testiranju prototipov detektorjev. Običajno se ne uporablja samega žarka iz pospeševalnika, ampak je ta usmerjen v tarčo, kjer pri reakcijah nastanejo sekundarni delci. Za testiranje prototipov smo uporabljali nabite pione z gibalno količino 100 GeV/c (testni žarek na superprotonskem sinhrotronu SPS) oziroma nabite pione in protone z gibalno količino 7 GeV/c (testni žarek na protonskem sinhrotronu PS).

Poleg rezultatov testiranja detektorjev za obročasti del sem v okviru naloge analiziral tudi podatke, dobljene pri testiranju dvostranskih detektorjev za cilindrični del. Pri tem sem se posvetil predvsem odvisnosti krajevne ločljivosti od vpadnega kota ionizirajočega delca in od razmerja signal/šum. Najprej bom opisal analizo rezultatov, dobljenih pri testiranju dvostranskih detektorjev, saj je bila zasnovana bolj splošno in sem jo z nekaj poenostavitvami lahko uporabil tudi pri obravnavanju enostranskih detektorjev obročastega dela.

4.2 Opis sistema

Glavna komponenta sistema za testiranje dvostranskih detektorjev v testnem žarku je osem enostranskih silicijevih detektorjev s krajevno ločljivostjo 8–10 μm , pri čemer štirje



Slika 4.1: Shematičen prikaz sistema, uporabljenega pri testiranju dvostranskih detektorjev v testnem žarku.

določajo X in štirje Y koordinato (x oz. y - vodoravni oz. navpični pasovi). Detektorji so združeni v dve skupini po štiri (dva X in dva Y), ki sta razmaknjeni okoli 40 cm (slika 4.1). Tako dobimo za vsak prehod nabitega delca štiri meritve vsake koordinate, kar omogoča natančno rekonstrukcijo sledi. Testirani detektor se nahaja v sredini sistema (med obema skupinama referenčnih detektorjev) na nosilcu, ki omogoča vrteneje detektorja okoli navpične osi.

4.3 Uvrščanje referenčnih detektorjev

Da bi dosegli rekonstrukcijo sledi z natančnostjo, ki jo omogoča visoka ločljivost detektorjev, moramo čim natančneje poznati njihove relativne položaje. Ta del analize imenujemo uvrščanje detektorjev. Pri tem najprej uvrstimo osem referenčnih detektorjev, ki se nahajajo na stalnem položaju. Testirani detektor uvrstimo kot zadnji korak analize s katero določamo njegovo krajevno ločljivost.

Zaradi velikega števila prostostnih stopenj sistema je pomembna izbira koordinatnega sistema, ki ga moramo vezati na detektorje. Izbral sem ga tako, da je X "ravnina" določena s srednjim pasom prvega in zadnjega Y detektorja in podobno Y "ravnina" s srednjim pasom prvega in zadnjega X detektorja. Os z je določena s presečiščem teh

ravnin in koordinatno izhodišče tako, da leži na prvem detektorju (z kordinata prvega detektorja je enaka nič). Tako izbran koordinatni sistem ni kartezičen, saj X in Y pasovi niso nujno pravokotni, poleg tega pa tudi pasovi enakoležnih (X oz. Y) detektorjev niso nujno vzporedni. Zaradi natančne mehanike, na katero so pritrejeni ti detektorji pa pričakujemo, da odmiki od kartezičnega koordinatnega sistema niso veliki.

Položaj vsakega detektorja opišemo s petimi parametri: x in z za X oziroma y in z koordinata za Y detektorje ter koti ϕ , α in β , ki opisujejo zasuk okoli Z , X in Y osi. Pri tem smo upoštevali, da je sistem neobčutljiv na premike detektorjev vzdolž pasov, zato X detektorji nimajo določene y koordinate in obratno. Položaj vsakega detektorja tako opišemo s kombinacijo treh rotacij in translacije, ki so potrebne, da detektor prenesemo iz izhodišča v dejanski položaj. To lahko opišemo z enačbo

$$\vec{r}^i = \vec{r}_0^i + R_\alpha^i R_\beta^i R_\phi^i \vec{r}^{i'} \quad , \quad (4.1)$$

kjer indeks i označuje detektor, R_α^i , R_β^i in R_ϕ^i so matrike rotacij okoli x , y in z osi in $\vec{r}_0^i$ ustrezna translacija. $\vec{r}^{i'}$ pri tem predstavlja enačbo pasu na i -tem detektorju. Položaj detektorjev določimo z minimizacijo parametra

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^{N_{dog}} \sum_{i=1}^{N_{det}} \frac{(x_{mer}^{i,k} - x_{pric}^{i,k})^2}{\sigma_i^2} \quad (4.2)$$

pri spreminjanju položajev detektorjev. Tu sta $x_{mer}^{i,k}$ in $x_{pric}^{i,k}$ merjena in pričakovana koordinata zadetka detektorja i pri dogodku k . Ločljivosti referenčnih detektorjev σ_i so znane iz predhodnih meritev. Vsota teče po vseh osmih referenčnih detektorjih ($N_{det} = 8$), število dogodkov N_{dog} pa sem omejil na 1200. Pri tem sem uporabil le dogodke z natanko enim zadetkom na vsakem detektorju, s čemer sem se izognil negotovosti pri izbiri zadetka, ki ustreza določeni sledi.

Z opisano izbiro koordinatnega sistema je določenih devet parametrov: x_0 prvega in zadnjega X detektorja, y_0 prvega in zadnjega Y detektorja, zasuk ϕ okoli z osi za te štiri detektorje ter z_0 prvega X detektorja. Za prilagajanje pa še vedno ostane 31 prostih parametrov, pri čemer je sistem na nekatere med njimi zelo slabo občutljiv. Take so z koordinate detektorjev, ki so z natančno izdelavo nosilcev določene z natančnostjo boljšo od 1 mm. Pri divergenci žarka pod 1 mrad to pomeni napako pod 1 μ m, kar je za red velikosti manjše od ločljivosti referenčnih detektorjev. Prav tako slabo je sistem občutljiv tudi na rotacije detektorjev okoli osi, ki leži v ravnini detektorjev in je pravokotna na pasove (R_α za X in R_β za Y detektorje). Odstopanje za 1° od pravokotne lege da na robu

detektorja (5 cm od sredine) le 1 mm napake na z koordinati oziroma pod $1 \mu\text{m}$ napake na pričakovanem položaju sledi.

Sistem pa je neobčuljiv tudi na usklajene rotacije vseh štirih detektorjev z enako orientacijo okoli osi, vzporedne s pasovi (R_β za X in R_α za Y detektorje). Ta bi se odražala kot efektivna sprememba razmika med pasovi (enaka rotacija vseh štirih detektorjev) ali pa kot spremenjen kot sledi glede na z os (če bi kot zasuka naraščal z z koordinato detektorjev). Zato privzamemo, da sta prvi in zadnji detektor vsake orientacije postavljena pravokotno na z os.

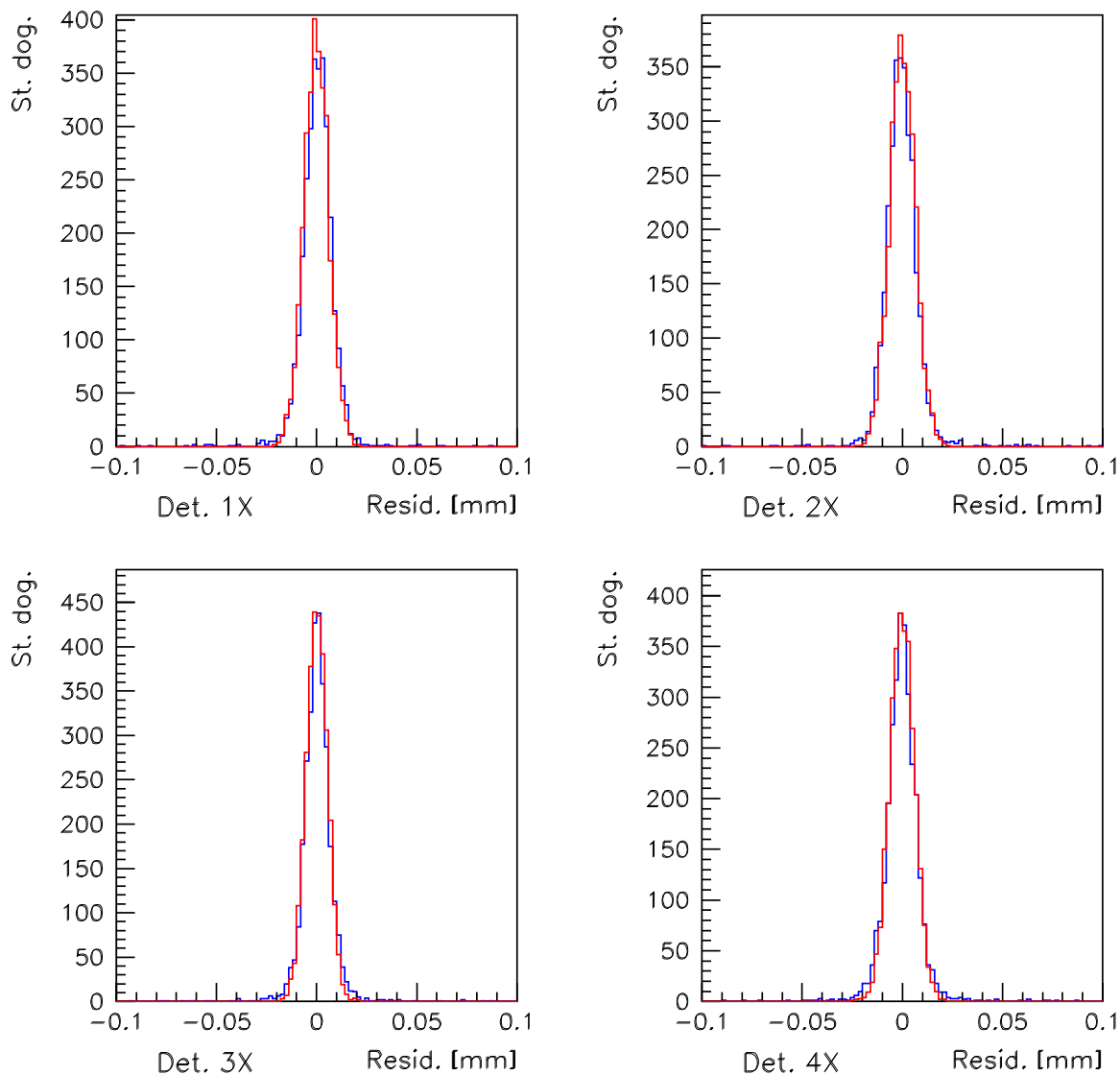
Za prilagajanje tako ostane 12 prostih parametrov: odmik v smeri, pravokotni na pasove (x_0 oz. y_0), zasuk okoli z osi (ϕ) in zasuk okoli osi, vzporedne s pasovi (β oz. α) za srednja para detektorjev.

Kvaliteto uvrščanja preverimo s porazdelitvijo razlike med pričakovanim in izmerjenim položajem zadetka za vse detektorje po končanem prilagajanju. Pri ločljivosti referenčnih detektorjev $8\text{--}10 \mu\text{m}$ bi pričakovali porazdelitev residuumov okoli ničle s širino okoli $5 \mu\text{m}$, kar se dobro ujema z rezultati uvrščanja (slika 4.2). Program sem preveril tudi na simuliranih podatkih, kjer sem generiral zadetke detektorjev na znanih položajih. Rezultati prilagajanja so se dobro ujemali s simuliranimi položaji detektorjev.

4.4 Določanje mesta zadetka

Ionizirajoč delec, ki potuje skozi detektor, povzroča nastanek parov elektron-vrzel v področju širine približno $1 \mu\text{m}$ okrog poti. Pri potovanju proti $p - n$ stiku se ta pas zaradi difuzije razširi na približno $10 \mu\text{m}$ (FWHM). Pri detektorjih z razmikom med čitalnimi pasovi $50 \mu\text{m}$ je torej precej verjetno, da si naboj delita dva pasova. V tem primeru je razmerje med signalom na enem in drugem pasu enolično povezano s koordinato prehoda nabitega delca. Tako s primernim algoritmom lahko dosežemo ločljivost, ki je precej boljša od $50\mu\text{m}/\sqrt{12}$, kot bi jo dala diskretna porazdelitev (signal le na enem pasu). Pri precej večjem razmiku med pasovi pa je verjetnost, da si bosta signal delila dva pasova, zanemarljiva.

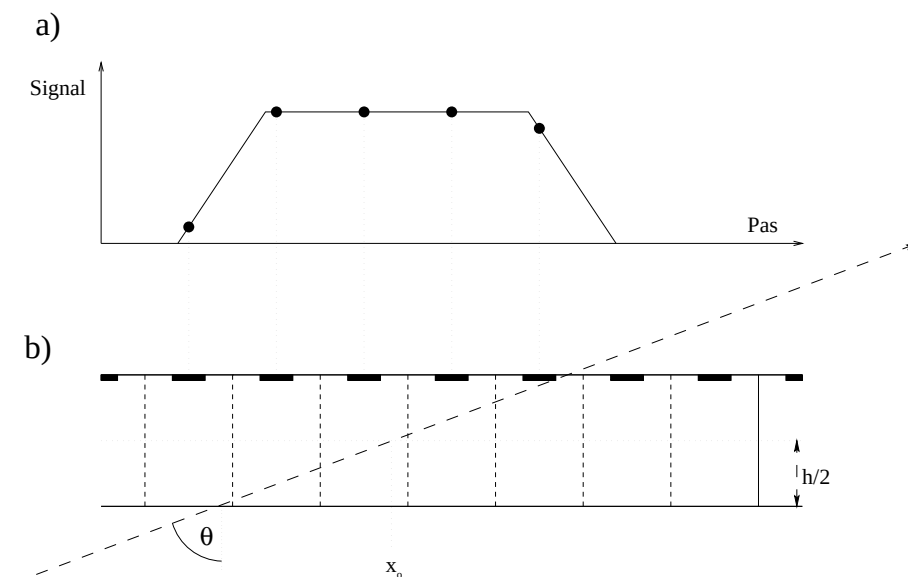
Višino signala na posameznem pasu uporabimo pri iskanju kandidatov za zadetek detektorja. Tega običajno definiramo kot skupino pasov z razmerjem signal/šum nad 3, za katere je vsota razmerij signal/šum nad 5. Ker je pri silicijevih pasovnih detektorjih tipično razmerje signal/šum za minimalno ionizirajoč delec nad 20 je to precej sproščen kriterij, ki omogoča zelo visok izkoristek (nad 95%).



Slika 4.2: Porazdelitev razlike med izmerjenimi in pričakovanimi položaji zadetkov po končanem uvrščanju detektorjev. Z modro so prikazani merski rezultati, z rdečo pa porazdelitve, dobljene s simulacijo.

Za natančno določanje kraja zadetka iz višine signalov v skupini pasov, ki ustrezajo zgoraj navedenim pogojem, obstaja več različnih algoritmov. Ti so prilagojeni različnim geometrijam detektorjev, razmerju signal/šum in vpadnemu kotu¹ nabitega delca. V splošnem pa jih lahko razdelimo v dve skupini, ločeni po vpadnem kotu oziroma po številu

¹Vpadni kot θ je kot med smerjo vpadnega žarka in normalo na detektor.



Slika 4.3: Razširitev signala pri poševnem vpadu. Dolžina poti nabitega delca skozi področje robnih pasov je odvisna od koordinate prehoda. V linearnem algoritmu je višina signala v posameznem kanalu linearno odvisna od dolžine poti ionizirajočega delca skozi področje pripadajočega pasu.

pasov v skupini.

- **Majhni vpadni koti (blizu pravokotnega vpada):** $\tan \theta \leq d_r/h$, kjer je d_r razmik med čitalnimi pasovi in h debelina detektorja (slika 4.3). V tem primeru je večino signala zbrana na enem ali dveh pasovih.
- **Veliki vpadni koti:** $\tan \theta > d_r/h$. Tu je signal porazdeljen po več kot dveh pasovih.

4.4.1 Algoritmi za majhne vpadne kote

Pri majhnih vpadnih kotih je zelo pomemben razmik med pasovi. Pri velikih razmikih (nad približno $50 \mu\text{m}$) bo pri pravokotnem vpadu naboj v večini promerov zbran le na enem pasu. Za določanje mesta zadetka tako lahko uporabimo le položaj zadetega pasu, medtem ko višine signala ne moremo uporabiti. V tem primeru je krajevna ločljivost detektorja približno enaka $d/\sqrt{12}$, kjer je d razmik med pasovi.

Če pa je razmik med pasovi manjši ali pa je vpadni kot dovolj velik, je večina signala porazdeljena po dveh pasovih. To je pri manjših razmikih med pasovi posledica razširitve naboja zaradi difuzije, razširitev zaradi nepravokotnega vpada pa je prikazana na sliki 4.3. To je za določanje mesta zadetka precej ugodnejše, saj lahko poleg položaja zadetih pasov upoštevamo tudi razmerje višin signala.

Pri osnovnem, tako imenovanem **linearnem η algoritmu** privzamemo, da je višina inducirane signala linearno odvisna od oddaljenosti pasu od mesta zadetka. Tako lahko oddaljenost kraja prehoda od levega pasu gruče (to je, pasu z nižjo zaporedno številko) določimo s težiščem signala

$$\eta = \frac{PH_R}{PH_L + PH_R} , \quad (4.3)$$

kjer sta PH_L in PH_R višini signala na levem oz. desnem pasu iz skupine. Položaj zadetka je torej določen kot

$$x = x_L + d_r \eta , \quad (4.4)$$

kjer je x mesto zadetka, x_L položaj levega pasu in d_r razmik med čitalnimi pasovi.

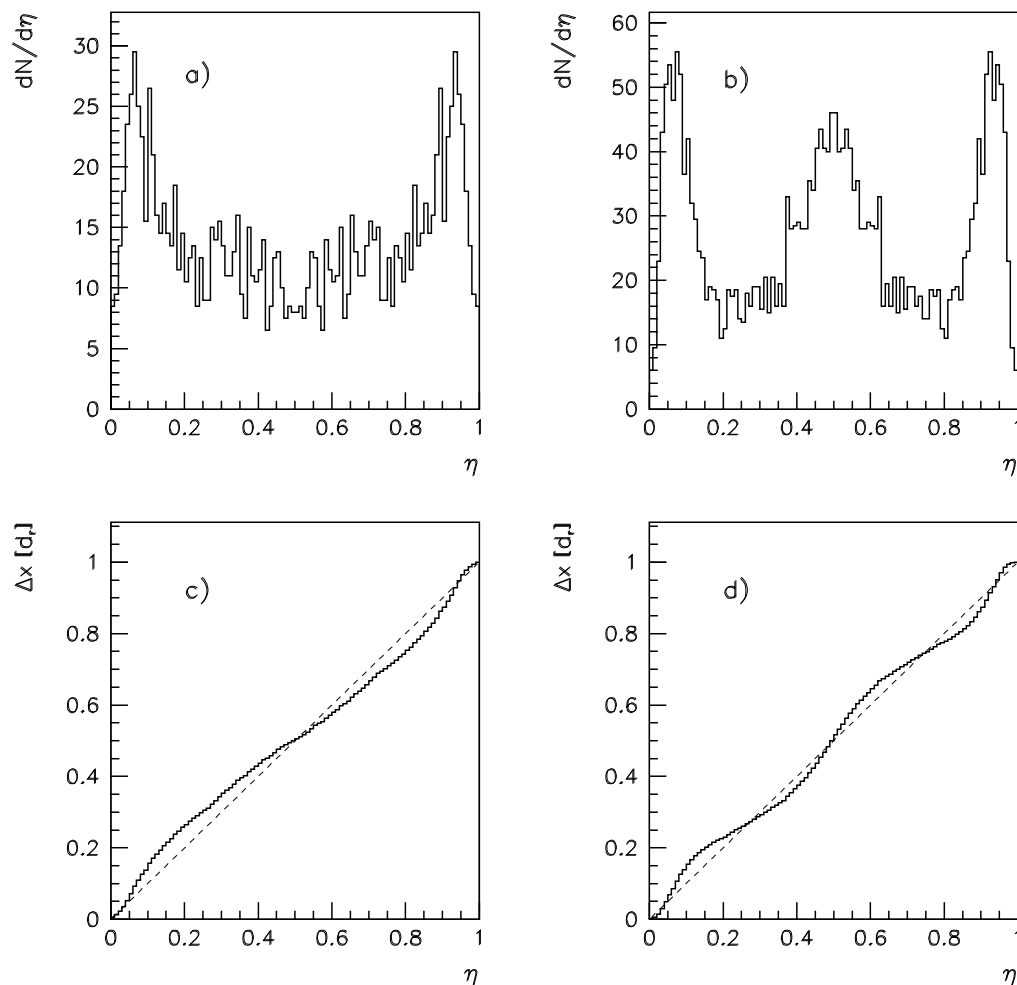
Pri potovanju proti pasovom se induciran naboj, ki je na začetku zbran približno 1 μm okoli sledi, zaradi difuzije širi. Tako je porazdelitev naboja v bližini strani p Gaussova in odvisnost med signalom in oddaljenostjo od pasu ni linearna. To prikazuje tudi porazdelitev števila dogodkov po parametru η (slika 4.4a, b). Pri homogenem obsevanju z ionizirajočimi delci bi dobili pri linearnem deljenju enakomerno porazdelitev, medtem ko odstopanje kaže na nelinearnost. Zvezo med parametrom η in mestom zadetka lahko dobimo iz integrala te porazdelitve (slika 4.4c, d). Tega uporabljamo kot umeritveno funkcijo pri tako imenovanem **nelinearnem η algoritmu**, pri katerem je mesto zadetka določeno z enačbo

$$x(\eta_o) = x_L + \frac{N(\eta_o)}{N(1)} d_r . \quad (4.5)$$

Tu je $N(\eta)$ vsota števila dogodkov z $\eta < \eta_o$ in $N(1)$ celotno število dogodkov v porazdelitvi.

4.4.2 Algoritmi za velike vpadne kote

Kot smo videli pri algoritmih za določanje položaja zadetka pri nizkih vpadnih kotih je ugodneje, če je signal porazdeljen po več pasovih, saj lahko tedaj uporabimo tudi višino signala. Vendar to velja le, dokler je signal na posameznem pasu bistveno večji od šuma. Pri sodobnih silicijevih pasovnih detektorjih je razmerje signal/šum za zadetek enega pasu

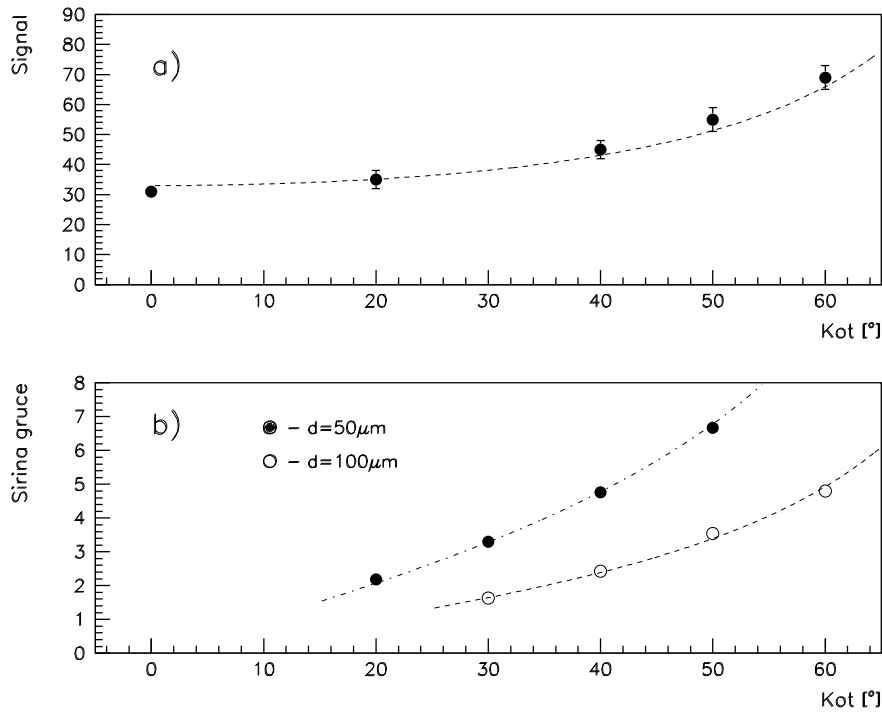


Slika 4.4: Porazdelitev števila dogodkov v odvisnosti od parametra η za detektor brez (a) in z interpolacijskim pasom (b). Integral teh porazdelitev, normiran na 1 pri $\eta=1$, podaja umeritveno funkcijo (c in d). Porazdelitev je prikazana za detektor s $50 \mu\text{m}$ razmikom med čitalnimi pasovi za pravokotni vpad nabitega delca.

ponavadi med 20 in 40, če pa je porazdeljen preko več pasov je to razmerje za posamezen pas ustrezno manjše, kar zmanjša ločljivost. Tako moramo razmik med pasovi izbrati tako, da signal ni porazdeljen preko prevelikega števila pasov.

Število pasov, na katerih pričakujemo signal, je podano z enačbo

$$N_s = \frac{h}{d_r} \tan \theta \quad \tan \theta > \frac{d_r}{h}, \quad (4.6)$$



Slika 4.5: a) Celotna višina signala in b) število pasov v skupini v odvisnosti od vpadnega kota delca. Črtkana črta predstavlja teoretično napoved (enačbi 4.7, 4.6), točke pa rezultate meritev strani n za $50 \mu\text{m}$ in $100 \mu\text{m}$ razmik med pasovi. Pri tem je število pasov v skupini določeno kot širina povprečne gruce (glej 'Prilagajanje oblike porazdelitve signalov', poglavje 4.4.2).

kjer je h debelina detektorja (okoli $300 \mu\text{m}$). Ker se s kotom spreminja dolžina poti ionizirajočega delca skozi detektor se s tem spreminja tudi celoten signal

$$PH(\theta) = \frac{PH(0)}{\cos \theta}. \quad (4.7)$$

Primerjava med napovedano in izmerjeno odvisnostjo celotne višine signala in števila pasov v skupini od vpadnega kota je prikazana na sliki 4.5. Signal na posameznem pasu se torej spreminja kot

$$PH_0(\theta) = \frac{PH(\theta)}{N_s} = PH(0) \frac{d_r}{h \sin \theta} \quad \tan \theta > \frac{d_r}{h}. \quad (4.8)$$

To pomeni, da je pri $50 \mu\text{m}$ razmiku med čitalnimi pasovi razmerje signal/šum za posamezen pas pri vpadnem kotu 40° štirikrat manjše kot pri pravokotnem vpadu.

Linearni algoritem

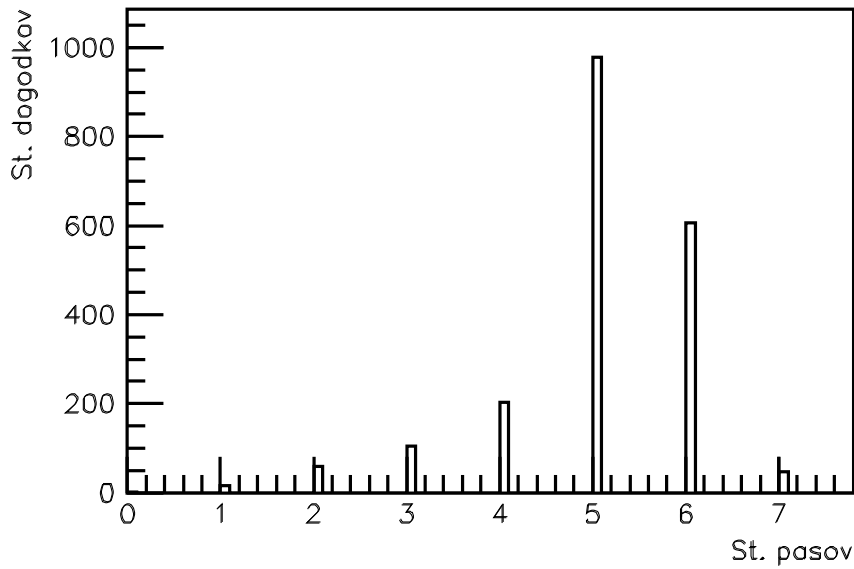
Za pasove v sredini skupine je signal približno konstanten in približno enak napovedi enačbe (4.8), pri čemer so odstopanja posledica šuma in Landau-ovih fluktuacij. Signal na robnih pasovih je odvisen od dolžine poti delca skozi področje robnega pasu, torej od koordinate prehoda nabitega delca (slika 4.3). Pri določanju koordinate prehoda skozi detektor² tako uporabimo le položaj in višino signala robnih pasov

$$x = \frac{1}{2} \left(x_L - \frac{PH_L}{PH_0} + x_R + \frac{PH_R}{PH_0} \right) d_r . \quad (4.9)$$

Tu sta x_L in x_R zopet položaj levega in desnega pasu, PH_L in PH_R višini signala na le-ter PH_0 pričakovana višina signala pri poti čez celotno področje pasu oz. najverjetnejša višina signala na pasovih v sredini skupine. Oblika signala, ki ga predvideva opisani linearni model je prikazana na sliki 4.3a.

V osnovi je ta model enak linearnemu η algoritmu. Tudi tu upoštevamo le višino signala na dveh robnih pasovih in njun položaj. Vendar ima zaradi večjega števila pasov v gruči več pomanjkljivosti. Tako je signal na robnih pasovih precej manjši, tako da so možne precej večje napake zaradi šuma in fluktuacij deponirane energije. Pri gručah z velikim številom pasov (S/N na posameznem pasu pod 5) se pojavijo tudi težave pri izbiri pasov, ki spadajo v gručo. Tedaj ni več vprašljiva le višina signala na robnem pasu ampak tudi izbira robnega pasu. Tako zahteva algoritem zelo natančno prilagojene kriterije za izbiro centralnih in robnih pasov, dopuščati pa moramo tudi vrzeli v gruči (pas s signalom, bistveno nižjim od pričakovanega). Na sliki 4.6 je prikazana porazdelitev števila dogodkov po številu pasov, sprejetih v skupino, za detektor s $50 \mu\text{m}$ razmikom med pasovi pri vpadnem kotu 40° . Vidimo lahko precejšnja odstopanja od pričakovanih 5–6 pasov v skupini in za napačno določene skupine bo velika tudi napaka pri določanju koordinate. Za algoritem pa je pomembno tudi natančno poznavanje parametra PH_0 , ki nastopa v enačbi (4.9). Zaradi fluktuacij signala in težav pri določanju srednjih pasov namreč povprečje višine signalov na pasovih iz sredine skupine za posamezen dogodek ni uporabno. Zato moramo ta parameter določiti vnaprej, s povprečevanjem preko velikega števila dogodkov.

²Koordinata prehoda je pri nepravokotnem vpadu določena kot mesto prehoda skozi sredino detektorja.



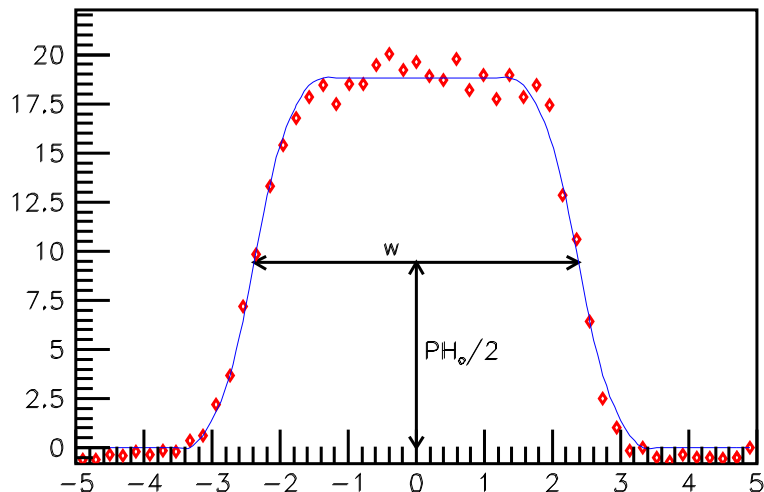
Slika 4.6: Porazdelitev števila dogodkov po številu pasov, ki so bili sprejeti v skupino pri linearnem algoritmu. Prikazani so podatki za detektor z razmikom med pasovi $50 \mu\text{m}$ pri vpadnem kotu 40° , kjer v skupini pričakujemo 5–6 pasov.

Prilagajanje oblike porazdelitve signalov

Ker sem se želeli izogniti natančnemu nastavljanju parametrov, ki je potrebno pri linearnem algoritmu, sem za določanje kraja preleta pri velikih vpadnih kotih razvil nov algoritem. Osnova zanj je možnost, da pri znanem vpadnem kotu delca, debelini detektorja in razmiku med pasovi lahko napovemo, kakšna bi morala biti širina gručice in višina signala na centralnih pasovih. S temi podatki lahko konstruiramo pričakovani obliko porazdelitve signala po pasovih v odvisnosti od mesta zadetka. Osnova za obliko je bila napoved linearne modela (slika 4.3a), ki sem ji zaoblil robove. Robove sem aproksimiral s funkcijo $\arctan$, sredico pa s konstanto (slika 4.7):

$$PH(x) = \begin{cases} 0. & \text{za } x < -\frac{d_r+0.9w}{2} \\ \frac{PH_0}{2} + C \arctan(k(x + \frac{w}{2})) & \text{za } -\frac{d_r+0.9w}{2} < x < -\frac{d_r-0.9w}{2} \\ PH_0 & \text{za } -\frac{d_r-0.9w}{2} < x < \frac{d_r-0.9w}{2} \\ \frac{PH_0}{2} + C \arctan(k(-x + \frac{w}{2})) & \text{za } \frac{d_r-0.9w}{2} < x < \frac{d_r+0.9w}{2} \\ 0. & \text{za } x > \frac{d_r+0.9w}{2} \end{cases} \quad (4.10)$$

Tu x meri odmik od sredine porazdelitve, w je širina porazdelitve na polovični višini in k parameter, ki določa obliko robu. Višina signala na sredini porazdelitve je določena z



Slika 4.7: Povprečna (točke) in pričakovana (polna linija) oblika porazdelitve signala v okolici mesta zadetka. Prikazani so podatki za detektor z razmikom med pasovi $50 \mu\text{m}$ pri vpadnem kotu 40° .

enačbo (4.8), širina porazdelitve z enačbo (4.6) in konstanta C z zahtevo, da je funkcija zvezna

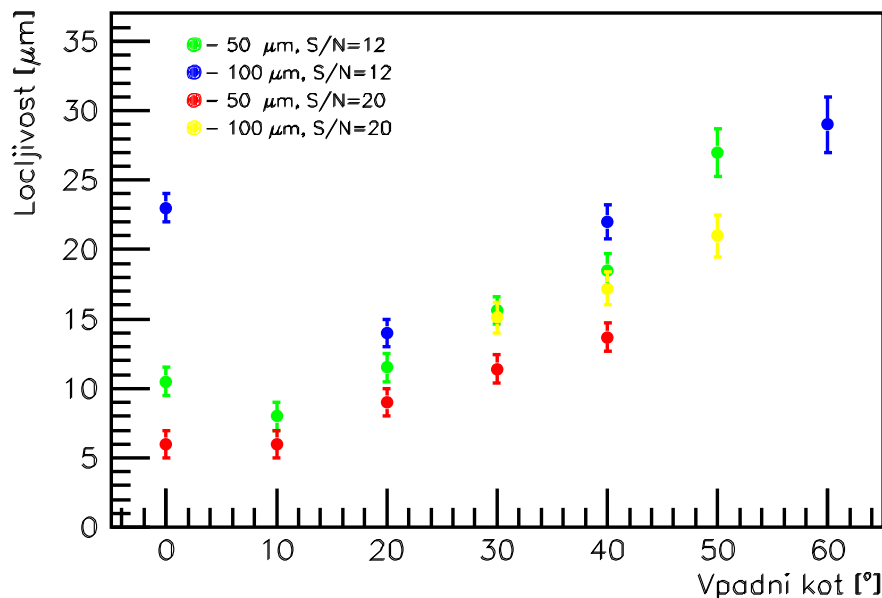
$$C = \frac{PH_0}{2 \arctan(w/k)} . \quad (4.11)$$

Parameter k je bil določen empirično tako, da je bila dosežena najboljša ločljivost. Sistem je na vrednost parametra k relativno neobčutljiv dokler se ta giblje v intervalu med $\frac{1}{w}$ in $\frac{3}{w}$, zato je smislen izbor $k = \frac{2}{w}$.

Povprečno obliko signala pa lahko določimo tudi popolnoma empirično. Pri tem merimo višino signala v odvisnosti od razdalje od mesta zadetka, povprečeno preko velikega števila dogodkov. Povprečujemo preko vseh pasov v okolici pričakovanega mesta zadetka (napoved iz zadetkov referenčnih detektorjev), brez selekcije po višini signala, tako da dobimo stvarno obliko. Povprečna in pričakovana (izračunana) porazdelitev signala za detektor z razmikom med pasovi $50 \mu\text{m}$ ob vpadnem kotu 40° sta prikazani na sliki 4.7.

Prilagajanje oblike porazdelitve signalov da v primerjavi z linearnim algoritmom nekoliko boljše rezultate pri zelo velikih vpadnih kotih. Glavna prednost pa je v tem, da ne potrebuje natančnega prilagajanja kriterijev za izbiro pasov s signalom. Edini parameter, na katerega je metoda občutljiva je namreč pričakovana širina porazdelitve, ki pa jo lahko določimo analitično (enačba 4.6).

4.5 Krajevna ločljivost v odvisnosti od vpadnega kota



Slika 4.8: Krajevna ločljivost v odvisnosti od vpadnega kota. Prikazani so rezultati za detektor VTT-42 s $(S/N)_n = 20$ in VTT-B z $(S/N)_n = 12$ za razmik med pasovi 50 μm in 100 μm .

V testnem žarku smo testirali dva detektorja z enako geometrijo. Pri prvemu, VTT-B, je bilo na strani n pri pravokotnem vpadu razmerje signal/šum za minimalno ionizirajoči delec enako 12:1, pri drugem, VTT-42 pa 20:1. Na strani p je bilo to razmerje za oba detektorja približno 25:1. Dimenzije detektorjev so bile $7.8\text{ cm} \times 1.9\text{ cm}$, s pasovi na strani p vzporednimi z daljšo stranico detektorja in pravokotnimi pasovi na strani n . Razmik med pasovi na strani p je bil 25 μm , s čitalno elektroniko je bil povezan vsak drugi pas. Na strani n je imela polovica detektorja razmik med pasovi 50 μm , druga polovica pa 100 μm . Na obeh delih so bili s čitalno elektroniko povezani vsi pasovi.

Meritve v testnem žarku so bile opravljene za različne vpadne kote med 0° in 60° , z osjo vrtenja vzporedno s pasovi na strani n . To pomeni, da se je področje z induciranim nabojem na strani p širilo vzporedno s pasovi, na strani n pa pravokotno na njih. Na obeh detektorjih sta bili ločeno analizirani področji s 50 μm in 100 μm razmikom med pasovi.

Za določanje mesta zadetka sem za majhne vpadne kote uporabil nelinearni η al-

Kot	Ločljivost VTT-B [μm]		Ločljivost VTT-42 [μm]	
	$d=50 \mu\text{m}$	$d=100 \mu\text{m}$	$d=50 \mu\text{m}$	$d=100 \mu\text{m}$
0°	10.5 ± 1	23 ± 1	6 ± 1	
10°	8 ± 1		6 ± 1	
20°	11.5 ± 1	14 ± 1	9 ± 1	
30°	15.6 ± 1		11.4 ± 1	15.1 ± 1.1
40°	18.5 ± 1.2	22 ± 1.2	13.7 ± 1	17.2 ± 1.2
50°	27 ± 1.7			21.5 ± 1.7
60°		29 ± 2		

Tabela 4.1: Krajevna ločljivost strani n detektorjev VTT-B ($(S/N)_n=12$) in VTT-42 ($(S/N)_n=20$) v odvisnosti od vpadnega kota. Razmik med pasovi je $50 \mu\text{m}$ oz. $100 \mu\text{m}$.

goritem, za večje pa prilagajanje oblike porazdelitve signalov. Uvrščanje detektorja je potekalo podobno kot uvrščanje referenčnih detektorjev. Ločljivost detektorja σ_{det} pri danih pogojih sem določil iz širine porazdelitve residuumov σ_{resid} in napake na rekonstrukciji sledi σ_{sled} po enačbi

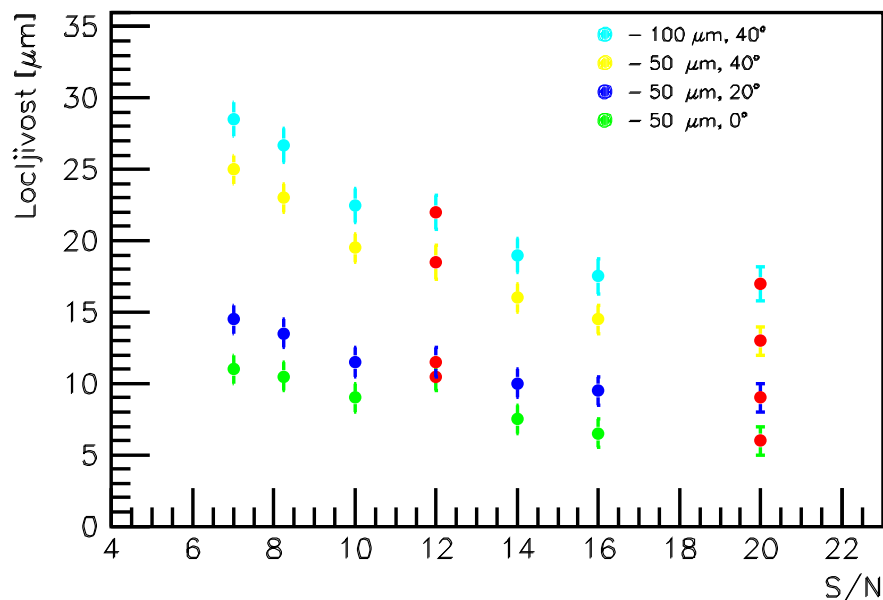
$$\sigma_{det}^2 = \sigma_{resid}^2 - \sigma_{sled}^2 \quad . \quad (4.12)$$

Napako na rekonstrukciji položaja zadetka σ_{sled} sem s simulacijo ocenil na $4\text{--}5 \mu\text{m}$. Rezultati analize strani n so predstavljeni v tabeli 4.1 in na sliki 4.8. Ločljivost na strani p se z vpadnim kotom ne spreminja bistveno in je $3 \pm 1.3 \mu\text{m}$.

Po pričakovanjih ločljivost detektorjev z naraščajočim kotom pada in sicer hitreje za detektor s slabšim razmerjem signal/šum. Tako je pri vpadnih kotih nad približno 50° na detektorju VTT-B z razmerjem signal/šum³ okoli 12 ugodnejši večji razmik med pasovi. Ta namreč pomeni manj zadetih pasov in torej večje razmerje signal/šum na posameznem pasu, kar izboljša ločljivost. Pri pravokotnem vpadu pa imajo detektorji z večjim razmikom med pasovi slabšo ločljivost, saj se v večini primerov ves naboj zbere na le enem pasu. Zato bo razmik med pasovi na strani n detektorjev valjastega dela naraščal s padajočim polarnim kotom (naraščajočim vpadnim kotom).

³Razmerje signal/šum detektorja je definirano za minimalno ionizirajoči delec pri pravokotnem vpadu.

4.6 Krajevna ločljivost v odvisnosti od razmerja signal/šum

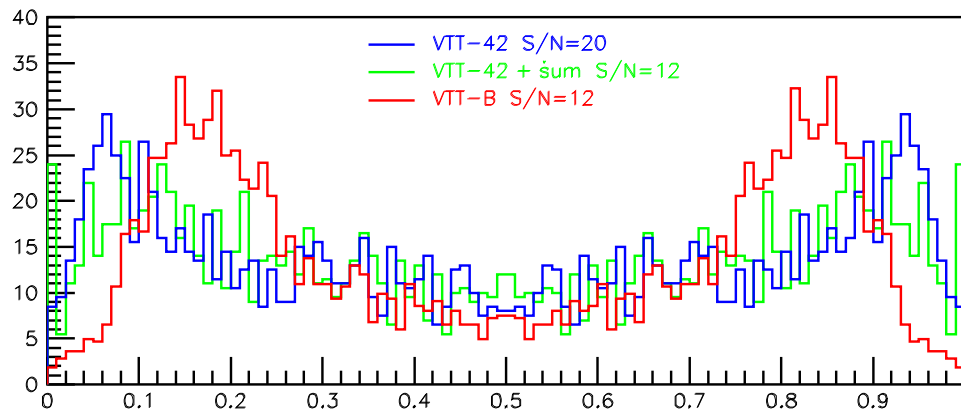


Slika 4.9: Krajevna ločljivost v odvisnosti od razmerja signal/šum. Z rdečo so prikazani izmerjeni rezultati, dobljeni pri testiranju detektorjev VTT-42 s $(S/N)_n = 20$ in VTT-B z $(S/N)_n = 12$. Ostali rezultati so simulirani z dodajanjem Gaussovo porazdeljenega šuma podatkom, dobljenim pri testiranju detektorja VTT-42.

Ker bo valjasti del silicijevega detektorja sestavljen iz zelo dolgih detektorjev, je pomembno oceniti najmanjše razmerje signal/šum, ki še omogoča dobro ločljivost. Z dolžino detektorjev namreč narašča dolžina pasov in torej njihova kapaciteta proti okolici ter zaporni tok, kar oboje prispeva k šumu.

Osnova za študij odvisnosti krajevne ločljivosti od razmerja signal/šum so bili podatki, dobljeni pri testiranju detektorja VTT-42 z razmerjem signal/šum na strani n $(S/N)_n = 20$. To razmerje sem umetno poslabšal tako, da sem rezultatom meritev dodal Gaussovo porazdeljen šum z različnimi povprečnimi višinami. Tako sem simuliral detektorje z razmerjem signal/šum enakim 16, 13.5, 10, 8 in 7. Tako popačene meritve sem analiziral s prej opisanim programom. Dobljeni rezultati so prikazani na sliki 4.9.

Rezultati kažejo, da se pri dovolj velikem razmerju signal/šum (nad približno 12) krajevna ločljivost z naraščajočim razmerjem le počasi izboljšuje, medtem ko pri nižjih



Slika 4.10: Porazdelitev dogodkov po parametru η . Z modro so prikazani rezultati za detektor VTT-42, z zeleno za detektor VTT-42 z dodanim Gaussovo porazdeljenim šumom, s katerim je bilo simulirano razmerje $(S/N)_n = 12$ in z rdečo za detektor VTT-B.

razmerjih zelo hitro upada. Ujemanje napovedi z meritvami detektorja VTT-B sicer ni popolno, vednar je v okviru napak sprejemljivo. Odstopanja so velika le pri pravokotnem vpadu, kjer je ločljivost detektorja VTT-B mnogo slabša od napovedane. To lahko pojasnimo, če si ogledamo porazdelitev dogodkov po parametru η (slika 4.10). Vidimo, da je zbiranje naboja na detektorju VTT-42 precej bolj linearno kot na detektorju VTT-B, kar poslabša ločljivost pri detektorju VTT-B, a ga z dodajanjem Gaussovo porazdeljenega šuma ne upoštevamo.

5. Poglavje

Meritve v testnem žarku - detektorji obročastega dela

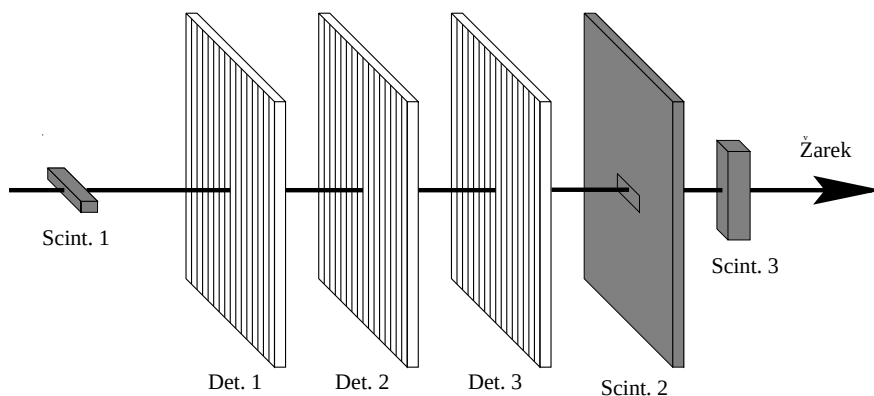
5.1 Opis sistema

Pri testiranju detektorjev za obročasti del mikroverteks detektorja smo uporabljali mehan-sko precej preprostejši sistem. Namesto teleskopa iz osmih referenčnih detektorjev z zna-nimi lastnostmi, s katerimi merimo obe koordinati, smo testni sistem sestavili iz treh testiranih detektorjev (slika 5.1). Osrednji del sistema so sestavljali trije detektorji, raz-maknjeni za 40 mm v smeri žarka. Pasovi vseh treh detektorjev so bili vzporedni, tako da smo lahko merili le eno koordinato. Detektorji so stali na pomični mizici, ki se je lahko gibala v obeh smereh, pravokotnih na smer žarka ter vrtela okoli navpične osi. Prožilni sistem je bil sestavljen iz treh scintilatorjev, dveh koincidenčnih (sc1, sc3) in enega anti-koincidenčnega (sc2) (glej sliko 5.1), ki so določali aktivno področje s površino $2 \times 8 \text{ mm}^2$.

Čitalni sistem je podoben sistemu za teste s svetlobnim izvorom, ki bo opisan kasne-je, le da so pogoji testiranja v testnem žarku zahtevali hitrejše zajemanje in zapisovanje podatkov.

5.2 Uvrščanje detektorjev in krajevna ločljivost

Ker opisani sistem omogoča le določanje koordinate preleta v smeri, pravokotni na ori-entacijo pasov, je uvrščanje detektorjev računsko preprostejši problem, vendar položaj de-tektojev določi manj natančno. Ker ne poznamo ortogonalne koordinate (y), ne moremo



Slika 5.1: Shematičen prikaz sistema za testiranje detektorjev obročastega dela v testnem žarku.

določiti relativnega kota zasuka okoli z osi (ϕ). To pomeni, da z razdaljo od sredine žarka sistematično pridobivamo napako na rekonstruiranem položaju zadetka, ki je enaka

$$\Delta x_i = y_i \tan \phi_i, \quad (5.1)$$

kjer je y_i odmik od sredine žarka v smeri pasov in ϕ_i zasuk i -tega detektorja okoli osi z . Zato je zelo pomembno, da je aktivna širina žarka v smeri pasov čim manjša. To smo dosegli z ozkim prvim scintilatorjem prožilnega sistema, ki je omejil širino žarka v y smeri na 2 mm. Zaradi natančne izdelave nosilcev pričakujemo zasuk detektorja pod 1° , iz česar sledi maksimalna napaka pri rekonstrukciji sledi $\Delta x_0 = 17 \mu m$. K ločljivosti to prispeva napako

$$\sigma_\phi = \sqrt{\Delta x^2} = \frac{2\Delta x_0}{\sqrt{12}} = 10 \mu m, \quad (5.2)$$

ki je pri pričakovani ločljivosti detektorjev okoli $30 \mu m$ še sprejemljiva.

Če primerjamo opisani sistem s sistemom za testiranje dvostranskih detektorjev ugotovimo, da za uvrščanje ostaneta le dva prosta parametra. To sta premik srednjega detektorja v smeri, pravokotni na pasove (x) in zasuk okoli osi, vzporedne s pasovi (β). Zopet minimiziramo spremenljivko χ^2 , enačba (4.2), ki jo sedaj zapišemo kot

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^{N_{dog}} \frac{(x_{mer}^k - x_{pric}^k)^2}{\sigma^2}, \quad (5.3)$$

kjer sta x_{mer}^k in x_{pric}^k izmerjeno in pričakovano mesto zadetka srednjega detektorja. Pri tem za določanje pričakovanega mesta zadetka uporabimo položaje zadetkov v robnih

Vpadni kot	0°	10°	20°	30°
Interpolacija	$35_{-3}^{+2} \mu\text{m}$	$23_{-4}^{+2} \mu\text{m}$	$18_{-4}^{+2} \mu\text{m}$	$23_{-4}^{+2} \mu\text{m}$
Prilag. 3 točkam	$36_{-3}^{+2} \mu\text{m}$	$22_{-4}^{+2} \mu\text{m}$	$18_{-4}^{+2} \mu\text{m}$	$21_{-4}^{+2} \mu\text{m}$

Tabela 5.1: Ločljivost detektorjev VFT, določena z interpolacijo sledi iz zadetkov robnih detektorjev in s prilagajanjem sledi zadetkom v vseh treh detektorjih. Ločljivost pri pravokotnem vpadu je $35_{-3}^{+2} \mu\text{m}$, kar se približno ujema z napovedjo diskretnega modela $100 \mu\text{m} / \sqrt{12} = 29 \mu\text{m}$.

detektorjih. Za določanje položaja zadetka sem pri vseh treh detektorjih in za vse kote uporabil nelinearni η algoritem.

Ker je v opisanem primeru pot ionizirajočega delca relativno slabo določena, saj imamo na voljo le dva zadetka v referenčnih detektorjih z neznano ločljivostjo, smo za določanje ločljivosti uporabili dve metodi. Pri prvi sled določimo iz zadetkov robnih detektorjev in ločljivost iz širine porazdelitve residuumov srednjega detektorja. Če predpostavimo, da je ločljivost vseh treh detektorjev enaka, dobimo zvezo med ločljivostjo in širino porazdelitve

$$\sigma_2^{det} = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_{resid} . \quad (5.4)$$

Pri drugi metodi sledi prilagajamo zadetkom na vseh treh detektorjih. Zopet predpostavimo, da je ločljivost vseh treh detektorjev enaka. Tedaj je kvadrat ločljivosti detektorjev enak vsoti kvadratov širin porazdelitev residuumov za posamezen detektor

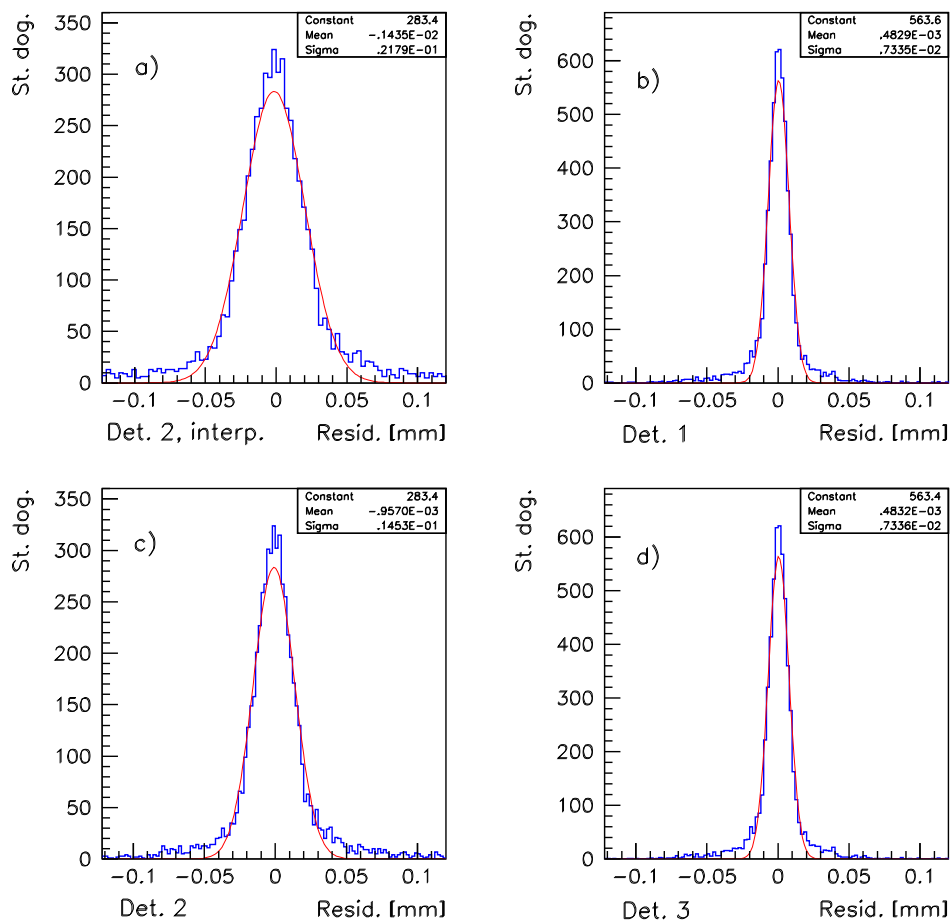
$$\sigma_3^{det} = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sigma_i^2} . \quad (5.5)$$

Na sliki 5.2a so prikazane porazdelitve residuumov srednjega detektorja pri interpolaciji sledi iz zadetkov na robnih detektorjih, na slikah b), c) in d) pa porazdelitve residuumov za prvi, drugi in tretji detektor pri prilagajanju sledi vsem trem zadetkom. Ustrezni ločljivosti detektorjev sta

$$\sigma_2^{VFT}(20^\circ) = 18_{-4}^{+2} \mu\text{m} \quad (5.6)$$

$$\sigma_3^{VFT}(20^\circ) = 18_{-4}^{+2} \mu\text{m} , \quad (5.7)$$

rezultati analize meritev pri ostalih kotih pa so prikazni v tabeli 5.1. Glavni prispevek k sistematski napaki je napaka na položaju detektorjev, upošteval pa sem še vpliv variacije parametrov algoritma za določanje mesta zadetka. Statistična napaka je zanemarljiva.



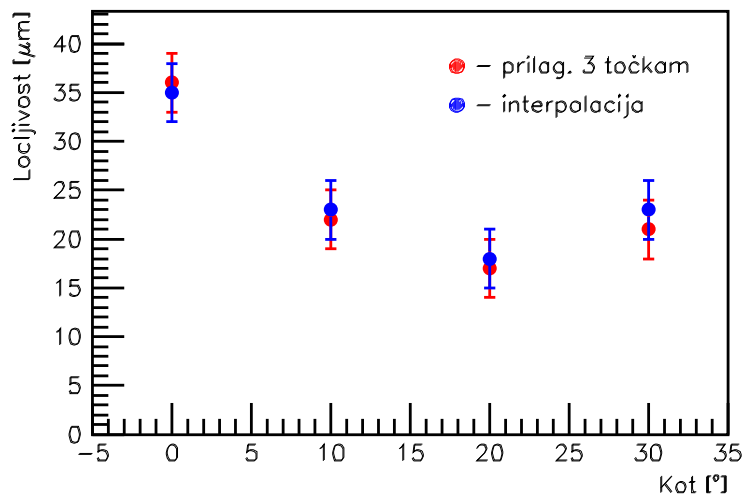
Slika 5.2: a) Porazdelitve residuumov srednjega detektorja pri interpolaciji sledi iz zadetkov na robnih detektorjih. Porazdelitve residuumov za prvi (b), drugi (c) in tretji (d) detektor pri prilagajanju sledi vsem trem zadetkom. Porazdelitve so prikazane za vpadni kot 20° . Iz obeh metod sledi ločljivost detektorjev $18 \mu\text{m}$.

Rezultati kažejo, da je ločljivost detektorjev za vpadne kote med 0° in 30° med $35 \mu\text{m}$ in $18 \mu\text{m}$, kar presega postavljene zahteve. Kotna odvisnost krajevne ločljivosti je prikazana na sliki 5.3. Ločljivost je najboljša pri vpadnem kotu 20° , pri katerem je pričakovana širina signala (enačba 4.6)

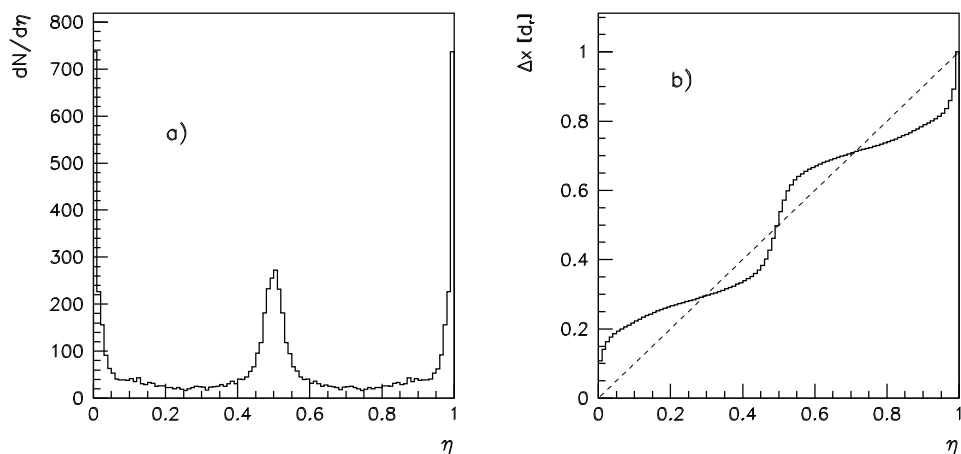
$$N_s = \frac{h}{d_r} \tan \theta = \frac{300 \mu\text{m}}{200 \mu\text{m}} \tan 20^\circ = 0.55, \quad (5.8)$$

torej nekaj več kot polovica razmika med čitalnimi pasovi. To pomeni, da bo signal v večini dogodkov porazdeljen po dveh pasovih, tako da lahko uporabimo polno moč

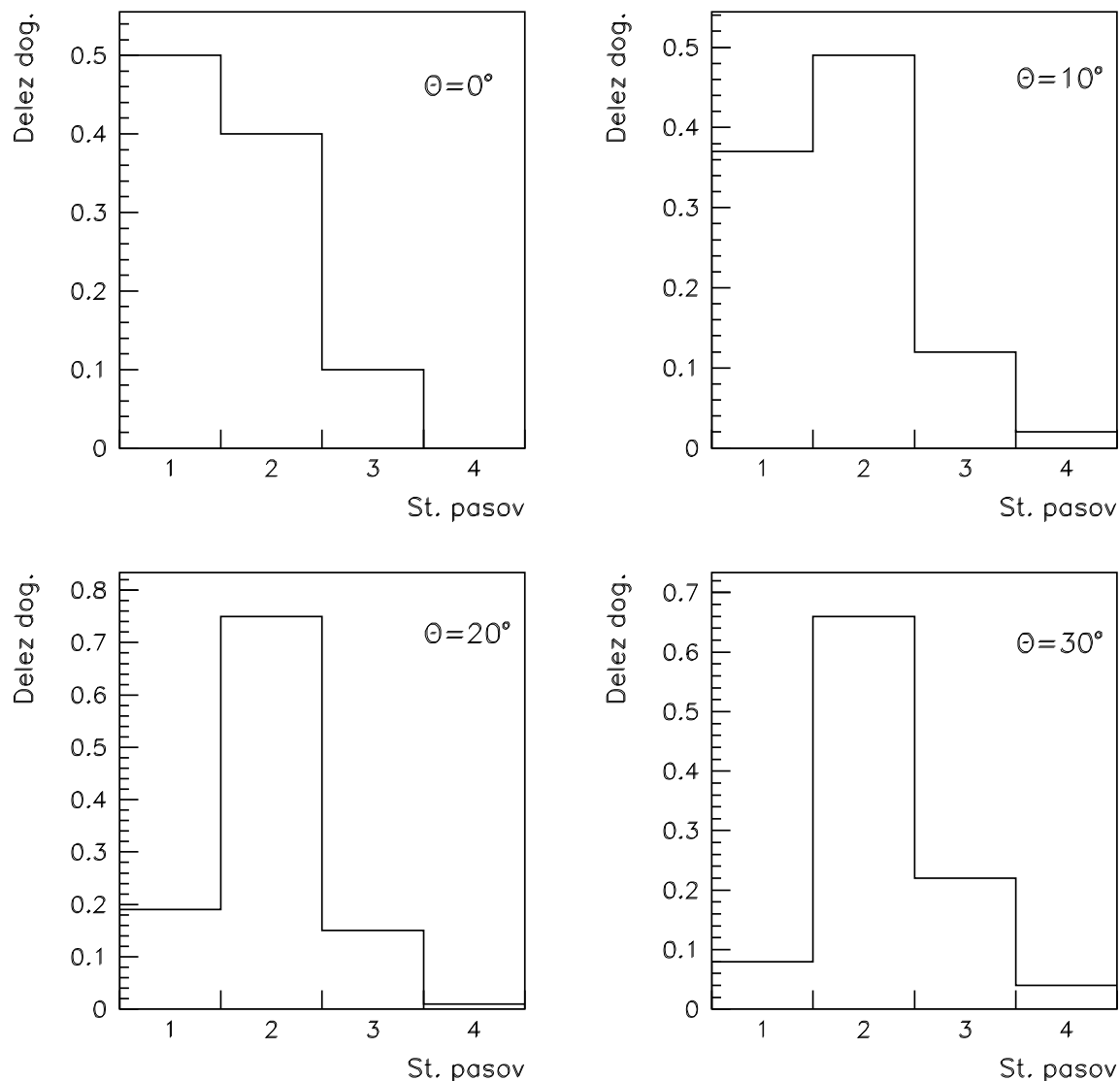
nelinearnega η algoritma. Pri manjših vpadnih kotih je ločljivost slabša, saj je delež dogodkov s signalom na le enem pasu večji, pri večjih pa je pri delu dogodkov signal porazdeljen po treh pasovih (sliki 5.4, 5.5).



Slika 5.3: Krajevna ločljivost detektorjev VFT v odvisnosti od vpadnega kota ionizirajočega delca.

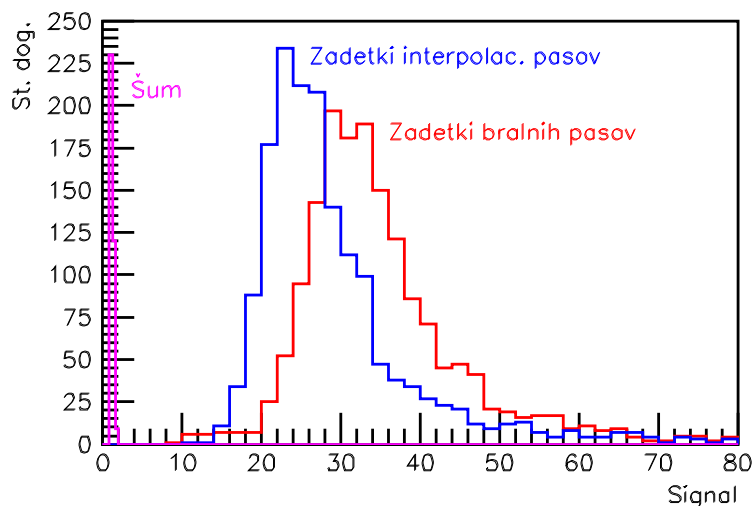


Slika 5.4: Porazdelitev števila dogodkov po parametru η (a) in normiran integral te porazdelitve (b). Porazdelitev je prikazana za detektor s $100 \mu\text{m}$ razmikom med čitalnimi pasovi in enim interpolacijskim pasom. Širina pasov je $40 \mu\text{m}$ in vpadni kot žarka 0° . Porazdelitev zadetkov (a) je skoraj diskretna, tako da umeritvena funkcija (b) močno odstopa od premice.



Slika 5.5: Porazdelitev dogodkov po številu pasov z razmerjem signal/šum večjim od tri, za vpad pod kotom 0° , 10° , 20° in 30° . Porazdelitve so prikazane za detektor VFT debeline $300 \mu\text{m}$, z razmikom med čitalnimi pasovi $200 \mu\text{m}$ in enim interpolacijskim pasom. Pri pravokotnem vpadu $\theta = 0^\circ$ pričakujemo enak delež dogodkov s signalom na enem (zadet čitalni pas) in na dveh pasovih (zadet interpolacijski pas). S kotom delež dogodkov s signalom na le enem pasu upada, saj delec tvori pare po širšem področju.

5.3 Prenos signala z interpolacijskih pasov



Slika 5.6: Višina signala za zadetke čitalnih (signal na enem pasu) ter interpolacijskih pasov (signal na dveh pasovih) za detektor s pasovi širine $60\ \mu\text{m}$. Prikazani so rezultati meritve v testnem žarku. Na sliki je prikazana tudi porazdelitev višine šuma.

Prenos signala z interpolacijskega na čitalne pasove določimo s primerjavo višine signala ob zadetkih interpolacijskih in ob zadetkih čitalnih pasov (slika 5.6). Pri tem je pomembno, da z dovolj veliko znesljivostjo ločimo dogodke obeh tipov. To lahko dosežemo na dva načina. Če imamo na razpolago zadetke v vseh treh detektorjih, lahko z interpolacijo iz zadetkov robnih detektorjev določimo mesti zadetka srednjega detektorja. Tako dobimo porazdelitev višine signala za dogodke obeh tipov brez selekcije po obliki ali višini signala. Vendar je bila ta metoda uporabna le za detektorje s pasovi širine $20\ \mu\text{m}$, saj smo imeli le pri njih postavitev s tremi detektorji. Zato sem moral pri detektorjih s pasovi širine $40\ \mu\text{m}$ in $60\ \mu\text{m}$ ločevati med zadetki čitalnih in interpolacijskih pasov na osnovi oblike signala. Kot je razvidno s slike 5.4 lahko dogodke dobro ločimo na osnovi parametra η . Ta je za zadetke interpolacijskih pasov približno $1/2$ kar pomeni, da imamo dva sosednja čitalna pasova z približno enakim signalom, za zadetke čitalnih pasov pa ima parameter η približno celo vrednost (0 ali 1), kar pomeni, da je večina signala zbrana na enem samem pasu.

Pri obeh metodah sem prenos določil kot razmerje najverjetnejših višin signalov za dogodke obeh tipov. Pri detektorjih s pasovi širine $20\ \mu\text{m}$ se rezultati obeh metod zelo dobro ujemajo ($58\% \pm 1\%$ za interpolacijo in $58\% \pm 1.5\%$ s selekcijo po parametru η). Za

detektorja s pasovi širine $40\text{ }\mu\text{m}$ oz. $60\text{ }\mu\text{m}$ smo dobili prenos $63.5\%\pm 0.8\%$ oz. $79\%\pm 1\%$.

Poleg porazdelitve dogodkov po višini signala je na sliki 5.6 prikazana tudi porazdelitev dogodkov po nivoju šuma. Iz razmerja najverjetnejšega signala in šuma lahko določimo razmerje signal/šum za zadetke čitalnih in interpolacijskih pasov. To je enako 29 za zadetke čitalnih in 23 za zadetke interpolacijskih pasov. Pri izbrani geometriji detektorja in doseženi kvaliteti detektorjev je razmerje signal/šum dovolj visoko tudi za zadetke interpolacijskih pasov, tako da ti učinkovito nadomeste čitalne pasove in tako zmanjšajo število izhodnih kanalov.

6. Poglavje

Testiranje detektorjev s svetlobnim izvorom

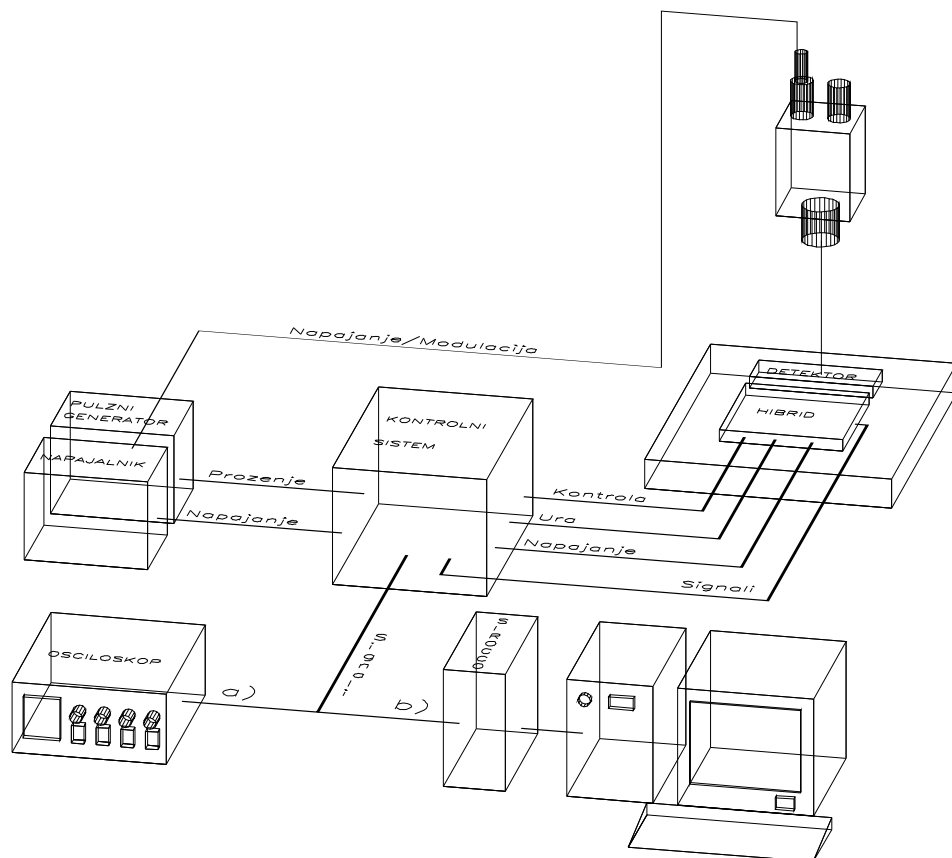
6.1 Izbira sistema

Za testiranje velikega števila detektorjev med proizvodnjo potrebujemo hiter in priročen sistem, ki deluje v domačem laboratoriju. Ker testni žarki teh zahtev nedvomno ne izpolnjujejo smo v ta namen razvili sistem z svetlobnim izvorom. Poleg hitrih nabitih delcev lahko namreč signal v silicijevem detektorju povzroče tudi fotoni z dovolj majhno valovno dolžino. Pri tem sta porazdelitev nastalih parov elektron-vrzel in višina signala drugačna kot za minimalno ionizirajoče delce, tako da testnega žarka s svetlobnim izvorom ne moremo nadomestiti. Vendar pa pravilno zasnovan sistem s svetlobnim izvorom omogoča precej boljšo kontrolo nad položajem inducirane signala, kar močno olajša testiranje vsakega posameznega pasu.

Poleg testiranja detektorja, opremljenega s hibridnim vezjem, je mogoče tudi samostojno testiranje hibridnega vezja. Čip MX6 je namreč zasnovan tako, da lahko s kalibracijskim signalom injeciramo naboj na vhod vsakega četrtega kanala, kar nadomesti signal z detektorja. Zato smo testirni sistem oblikovali tako, da omogoča tudi testiranje samostojnih hibridnih vezij.

6.2 Opis sistema

Sistem za testiranje detektorjev (slika 6.1) je sestavljen iz krmilnega (dodatek B), čitalnega in optičnega sistema.



Slika 6.1: Shematski prikaz sistema za testiranje detektorjev s svetlobo.

6.2.1 Optični sistem

Optični sistem je sestavljen iz svetlobnega izvora, mikroskopa in premične mizice.

Kot zelo primeren svetlobni izvor za naš sistem se je izkazala svetlobna dioda (LED). Časi prižiganja in ugašanja so zelo kratki (10-100 ns), napajanje je mogoče kar s TTL signalom in na voljo so diode z različnimi valovnimi dolžinami. Odločili smo se za diodo z vrhom spektra pri 960 nm, saj je tam vdorna globina v *Si* okoli 40 μm . Tako dobimo ioniziran signal porazdeljen vsaj po delu debeline detektorja. Vidna svetloba, ki je za delo sicer prikladnejša, ima vdorno globino bistveno manjšo (približno 3 μm pri 700 nm) in ioniziran naboj je le površinsko porazdeljen.

Druga komponenta sistema je binokularni mikroskop Technival 2 Zeiss. Povečava okularja je 16-kratna, objektiv pa ima zvezno nastavljivo 0.63 – 6.3-kratno povečavo. Dioda je s posebnim nosilcem vstavljena namesto desnega okularja. Da bi na detektorju dobili čim manjšo sliko svetlobnega izvora je pod diodo reža širine 100 μm . Pri največji povečavi objektiva tako na detektorju dobimo svetlobno pego s širino okoli 16 μm . Ta širina je precej manjša od razmika med pasovi, tako da lahko s svetlobnim izvorom testiramo odziv posameznih pasov.

Za premikanje mikroskopa s svetlobnim izvorom uporabljamo računalniško krmljeno pomično mizico ISEL. Za pomikanje v XY ravnini skrbita dva pravokotno postavljena koračna motorčka s korakom 12.5 μm . Za krmiljenje motorčkov uporabljamo komercialni kontroler ISEL CNC C10.

6.2.2 Čitalni sistem

Izhod MX6 čipa¹ na hibridnem vezju sta analogna signala A1 (naboj ob signalu S1) in A2 (naboj ob S2). Ta po kaptonskem kablu vodimo na kontrolno kartico, ki signala odšteje in ojača. Tako dobljen analogni signal skupaj z digitalnim signalom CONVERT² vodimo v CAMAC čitalni procesor SIROCCO [9].

Glavna naloga čitalnega procesorja SIROCCO je analogno-digitalna pretvorba signalov, ki jih pošlje kontrolna kartica. V ta namen je opremljen z 10-bitnim analogno-digitalnim pretvornikom, ki omogoča digitalizacijo do 2048 kanalov. Vsebuje še signalni procesor za redukcijo podatkov, ki omogoča odštevanje ničelnega nivoja vsakega kanala posebej in izbor kanalov s pozitivnim signalom. Izhod iz modula SIROCCO predstavljajo digitalizirani signali, ki jih spremljajo naslovi kanalov (zaporedne številke kanalov). Tak izhod je primeren za računalniško obdelavo.

Ker smo želeli dobiti pri testiranju detektorjev čim popolnejše podatke, smo modul SIROCCO uporabljali le kot analogno-digitalni pretvornik, medtem ko možnosti redukcije podatkov nismo uporabljali.

¹Glej poglavje 2.3.

²Signal CONVERT je ustrezno zakasnen signal ure, ki poganja čipe MX6. Naraščajoči rob (digitalnega) CONVERT signala določa čas vzorčenja analognega signala.

6.2.3 Programska oprema

Program za branje detektorja ter obdelavo in prikaz podatkov sem napisal v okolju LabWindows v programskem jeziku C. Programsko okolje LabWindows ponuja bogato programsko knjižnjico s podprogrami za komunikacijo računalnika z zunanjimi moduli in za grafični prikaz rezultatov, poleg tega pa ponuja tudi prijetno okolje za pisanje in testiranje programov.

Vhodne podatke programa (izhod iz čitalnega procesorja SIROCCO) predstavlja niz podatkov o višini signala v posameznem kanalu, opremljenih z naslovi kanalov. Program omogoča določanje in odštevanje ničelnega nivoja detektorja za vsak kanal posebej³ in izračuna nihanje tega nivoja (šum kanala) ter rezultate grafično prikaže (prikaz po pasovih ali prikaz spektra). Za testiranje hibridnih vezij s kalibracijskimi signali program ponuja možnost avtomatičnega iskanja mrtvih kanalov (kanalov, na katere vodimo kalibracijski signal, a ga ne zaznamo) in napak (kanali s signalom, na katere ne vodimo kalibracije). Za testiranje modulov s svetlobnim izvirom pa ponuja možnost avtomatičnega testiranja vseh pasov detektorja. V tem primeru program premika svetlobno pego preko detektorja, prikazuje odziv pasov s signalom in ga primerja s pričakovanim signalom. Na ta način lahko z dokaj hitrim testom (okoli 2 min.) določimo mrtva področja (pasove, ki se ne odzivajo na svetlobni pulz), stike med pasovi in napake v povezavi detektorja s čitalno elektroniko (na primer zamik pri bondiranju). Program omogoča tudi kontrolo pomične mizice in spremlja njen položaj, omogoča pa tudi analizo spektra signalov.

6.3 Rezultati

Pri testiranju detektorjev obstajata dve glavni stopnji: testiranje hibridnega vezja s kalibracijskimi signali in testiranje sestavljenega detektorja z izvirom svetlobe. Opisal bom rezultate testiranja enega od detektorjev, podal statistično analizo ostalih že testiranih detektorjev in na kratko opisal napake, s katerimi se srečujemo.

6.3.1 Testiranje detektorjev s svetlobo

Preden silicijev detektor povežemo s čitalno elektroniko preverimo, če ustreza zahtevanim kriterijem: dovolj majhen tok v zaporni smeri (pod $15 \mu\text{A}$), deplecijska napetost pod 60 V in upornost napajalnega upornika nad $30 \text{ M}\Omega$. Prav tako pri sestavljanju uporabimo le

³Algoritem za določanje ničelnega nivoja in šuma je opisan v dodatku C.

hibridna vezja, na katerih nismo odkrili nobenih napak. Zato je glavni namen testiranja detektorjev s svetlobnim izvorom iskanje slabih kanalov.

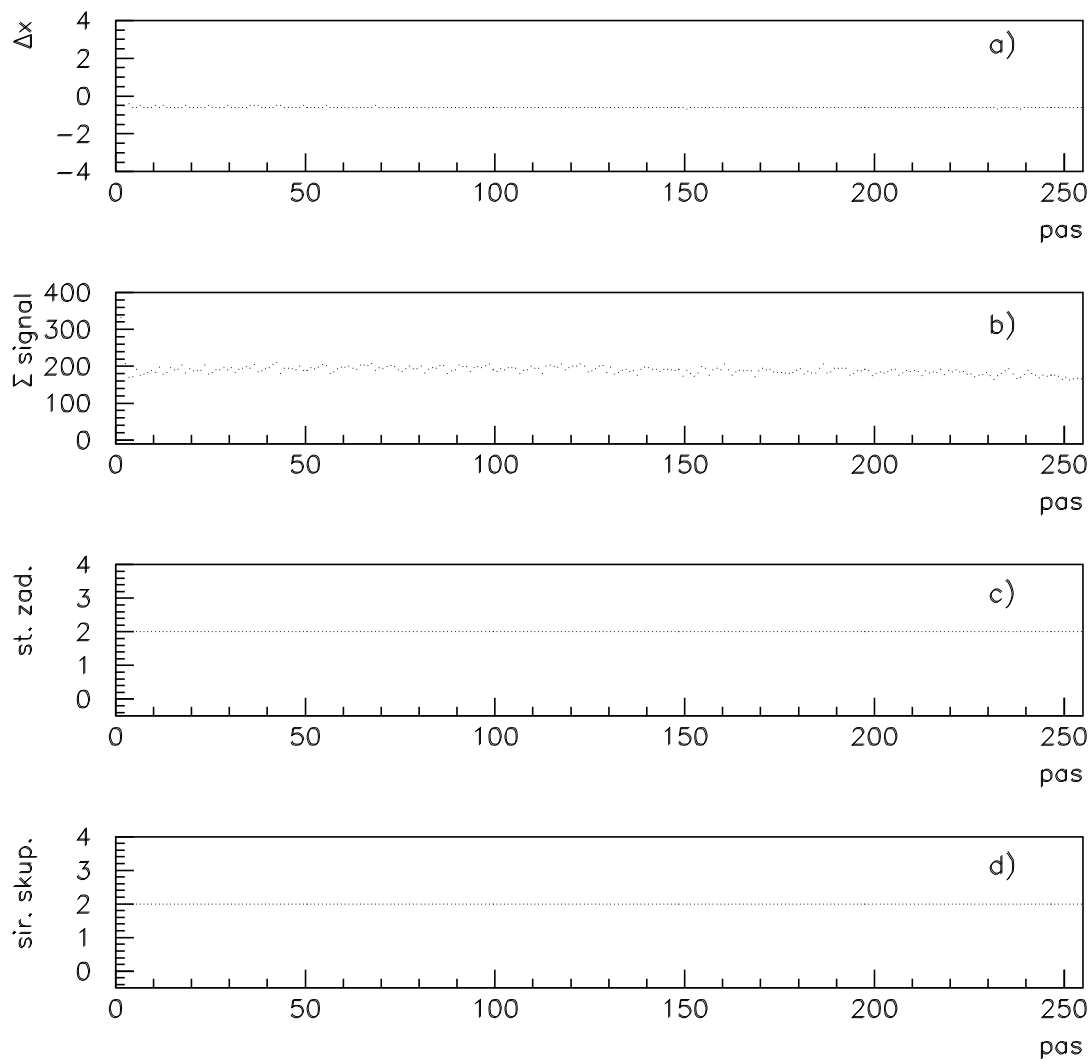
Prvi korak pri testiranju je določanje ničelnega nivoja in šuma vsakega kanala. Če se njuna oblika in nivo ujemata s pričakovanji, sledi testiranje odziva posameznih pasov na svetlobni signal. Najprej mikroskop pozicioniramo tako, da je slika diode LED fokusirana približno $100\ \mu\text{m}$ pred prvim čitalnim pasom. V avtomatičnem delu testiranja se potem mikroskop pomika v korakih po $200\ \mu\text{m}$.⁴ Po vsakem koraku dioda odda kratek svetlobni pulz in z detektorja preberemo odziv. Ker je svetlobni pulz usmerjen na interpolacijski pas pričakujemo enaka signala na obeh sosednjih (čitalnih) pasovih. Pri detektorju brez napak torej pri vsakem dogodku pričakujemo signal na dveh sosednjih pasovih⁵. Zato program najprej poišče pas z najvišjim signalom (razlika med prebrano vrednostjo in ničelnim nivojem), za katerega je razmerje med signalom in šumom večje od praga (običajno 10). Nato v okolici poišče vse sosedbe, ki ustrezajo enakemu pogoju, to je, poišče strnjeno gručo pasov z razmerjem signal/šum nad pragom. Iz naslovov pasov v skupini in razmerij višin signalov določi položaj zadetka kot težišče signalov in ga primerja s pričakovanim položajem. Višine signalov in odstopanje položaja zadetka shrani za nadaljno obdelavo in cikel ponovi na naslednjem pasu. Če pri danem poskusu ni pasov z zadostnim signalom ga največ petkrat ponovimo.

Rezultat testiranja detektorja je število zadetkov na vsakem pasu, višina prvega signala, vsota višin prvih dveh zadetkov, vsota višin vseh zadetkov, število pasov v skupini ob vsakem dogodku in odstopanje položaja zadetka od pričakovane vrednosti. Pri detektorju brez napak pričakujemo dva zadetka na vsakem pasu, po detektorju enakomerno višino signalov, pri vsakem dogodku dva zadeta pasova in zadetek na pričakovanem položaju. Rezultati testiranja detektorja brez napak so prikazani na sliki 6.2.

Napake na detektorju se pri testiranju pokažejo na več načinov. Najpogostejša napaka je osamljen mrtev kanal. V tem primeru ta kanal nima zadetka in vsota signalov je enaka nič. Ker torej dobimo signal le na enem pasu (sosedu) je tudi rekonstruiran položaj zadetka premaknjen za pol razmika med čitalnimi pasovi in sicer pri prvem dogodku v levo in pri drugem v desno. Kadar pa je neobčutljivih več sosednjih pasov se to kaže kot področje pasov z vsoto signalov enako nič in hkrati v tem področju ni bilo dogodkov,

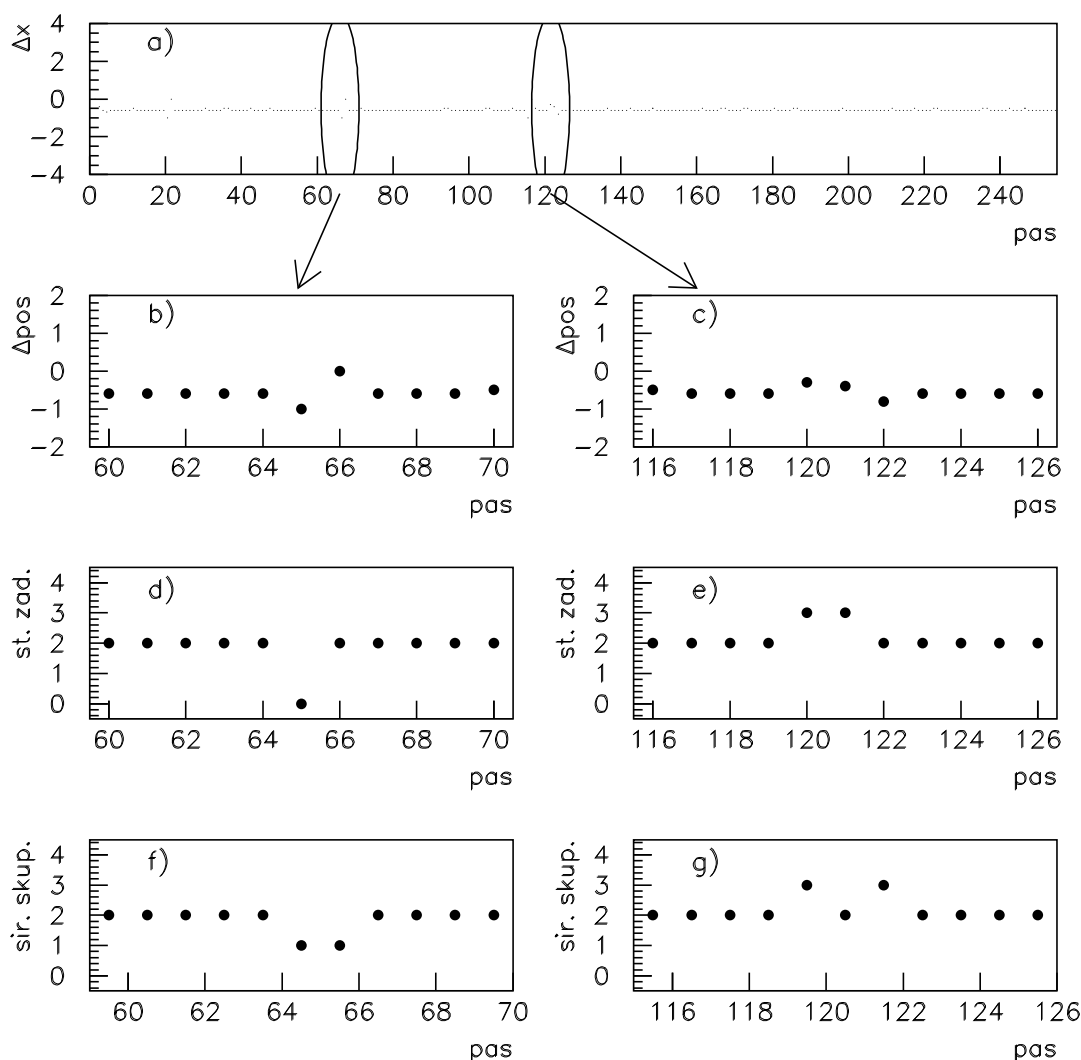
⁴Ker je razmik med čitalnimi pasovi na detektorju enak $198\ \mu\text{m}$, česar s premično mizico z najmanjšim korakom $12.5\ \mu\text{m}$ ne moremo doseči, program neprestano preverja odstopanje dejanskega položaja od željenega. Če bi razlika presegla $8\ \mu\text{m}$ se korak skrajša, tako da je razmik med željenim in dejanskim položajem vedno manjša od $8\ \mu\text{m}$.

⁵Višina signala je odvisna od jakosti in trajanja svetlobnega pulza. Jakost je določena s širino reže ($100\ \mu\text{m}$) in parametri mikroskopa, dolžina pulza pa je $1 - 1.5\ \mu\text{s}$.



Slika 6.2: Primer detektorja brez napak (detektor T04). a) Odstopanje položaja od pričakovane vrednosti. b) Vsota višin vseh zadetkov. c) Število zadetkov na posameznem pasu. d) Število pasov v skupini.

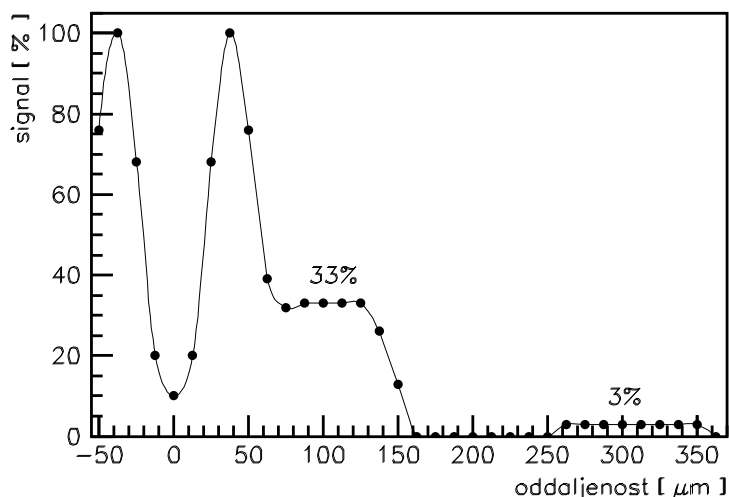
ki bi ustrezali zahtevanim kriterijem. Pogosta napaka je tudi stik med dvema ali več pasovi. Na takem področju opazimo skupine z več kot dvema zadetima pasovoma, ki imajo po več kot dva zadetka. Opazimo lahko tudi zamik pri bondiranju kot skok v razliki med pričakovanim in izmerjenim položajem zadetka in kombinacije teh napak. Primeri nekaterih napak so prikazani na sliki 6.3.



Slika 6.3: Rezultati testiranja detektorjev z mrtvimi kanali številka 19, 65, 114 in stikom med kanaloma 120 in 121. a) razlika med pričakovanim in izmerjenim položajem zadetka za celoten detektor ter povečava za okolico pasu 65 (b) in 121 (c). d) in e) Število zadetkov na posameznem pasu. f) in g) Število zadetih pasov v skupini.

6.3.2 Merjenje prenosa signala

S svetlobnim izvorom je mogoče tudi merjenje prenosa signala z interpolacijskih pasov na sosedo. Ker z opisanim sistemom lahko natančno kontroliramo položaj zadetka, lahko opazujemo odvisnost višine signala na izbranem pasu od oddaljenosti mesta ionizacije. Primer take meritve za detektor s pasovi širine $40 \mu m$ je prikazan na sliki 6.4. Na sliki

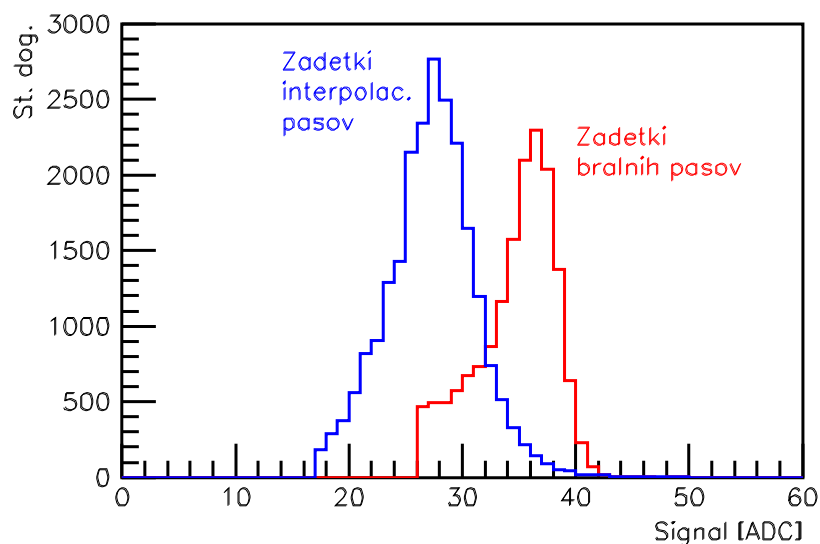


Slika 6.4: Višina signala na čitalnem pasu v odvisnosti od oddaljenosti kraja ionizacije. Rezultati so predstavljeni za detektor s pasovi širine $40\ \mu\text{m}$. Razmik med pasovi je $100\ \mu\text{m}$, beremo vsak drugi pas.

je lepo viden prehod med področjem, s katerega se signal zbere na čitalnem pasu in področjem, s katerega signal zbere interpolacijski pas. Iz razmerja višin signalov lahko določimo tudi prenos na najbližje in na bolj oddaljene sosedje. Za pasove širine $40\ \mu\text{m}$ se na najbližji čitalni pas prenese približno 33% signala in na naslednji čitalni pas približno 3%, kar se dobro ujema z napovedjo modela (3%, slika 3.2). Za detektor s pasovi širine $20\ \mu\text{m}$ so ustrezni prenosi 28% in 3% (model: 29%, 5%), pri detektorjih s $60\ \mu\text{m}$ širokimi pasovi pa meritev ni mogoča. Čitalni pasovi so namreč pokriti z aluminijem, ki svetlobe ne prepušča in ki pri tako širokih pasovih seže skoraj do meje med čitalnim in interpolacijskim pasom. Tako ni več mogoče normiranje odziva na signal pri zadetku čitalnega pasu.

6.3.3 Merjenje prenosa signala z izvorom Am^{241}

Ne detektorju s pasovi širine $60\ \mu\text{m}$ smo prenos signala določili še z $59.5\ \text{keV}$ fotoni iz izvora Am^{241} . Pri tem smo uporabili rahlo prirejen sistem za testiranje s svetlobnim izvorom. Pri radioaktivnem izvoru dogodka namreč ne moremo sprožiti ob željenem trenutku. Poleg tega pa fotonov, ki se v detektorju absorbirajo in tvorijo pare, ne moremo več zaznati, in jih torej ne moremo uporabiti za proženje. Ker torej nikakor ne moremo ugotoviti, kdaj je do ionizacije prišlo, moramo kar najhitreje brati in analizirati signal z detektorja. V ta namen sem priredil program za delo s svetlobnim izvorom in ga optimiziral za čim hitrejše zajemanje podatkov. Tako je analiza omejena na iskanje morebitnih pasov s signalom nad



Slika 6.5: Višina signala za zadetke čitalnih (signal na enem pasu) ter interpolacijskih pasov (signal na dveh pasovih) za meritev s fotoni energije 59.5keV iz izvora Am^{241} .

izbranim pragom in zapis le teh na datoteko ter sledenje spreminjanju ničelnega nivoja. Z optimizacijo sem dosegel analizo 50 dogodkov/sekundo, kar da ob aktivnem oknu širine $5\ \mu\text{s}$ izkoristek $2.5 \cdot 10^{-4}$. Iz znane aktivnosti izvora (55 kBq), približno četrtnine celotnega prostorskega kota, ki ga je pokrival detektor in verjetnosti za absorpcijo fotona z energijo 59.5keV v siliciju debeline $300\ \mu\text{m}$ (okoli 1%) lahko ocenimo pogostost zaznanih dogodkov na okoli 2/min (meritev: približno 3/min).

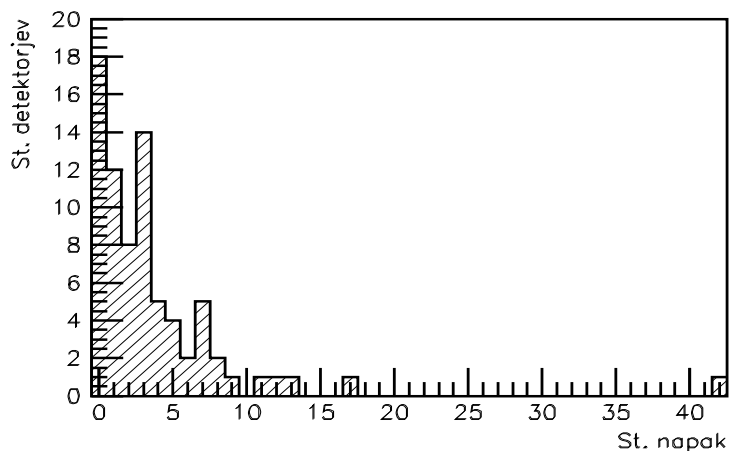
Porazdelitev dogodkov po višini signala za zadetke čitalnih in interpolacijskih pasov je prikazana na sliki 6.5. Zaradi diskretnega spektra fotonov dobimo vrhova približno Gaussove oblike in ne Landau-ove, kot pri meritvi v testnem žarku. Iz položaja obeh vrhov lahko določimo prenos signala z interpolacijskih pasov na $76 \pm 2\%$.

6.3.4 Rezultati testiranja

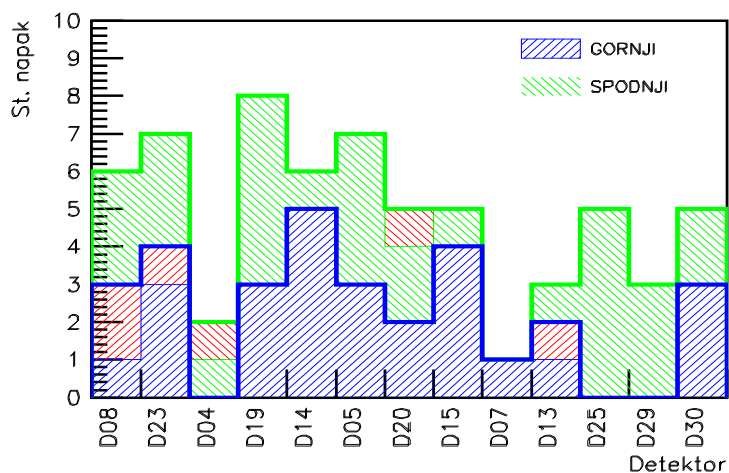
Vsak detektor, opremljen s čitalno elektroniko, je testiran dvakrat. Prvič je testiran kot enostranski modul saj lahko na njih del napak s ponovnim bondiranjem slabih kanalov še popravimo. Drugi test pa sledi lepljenju enostranskih modulov v dvostranske in je namenjen predvsem iskanju novih napak nastalih pri lepljenju.

Rezultati testiranja enostranskih modulov so prikazani na sliki 6.6, dvostranskih pa

na sliki 6.7. Iz prikazanih porazdelitev lahko ugotovimo, da smo na večini detektorjev dosegli pod 2% slabih kanalov, kar zagotavlja visok izkoristek detektorjev pri sledenju nabitih delcev.



Slika 6.6: Rezultati testiranja enostranskih modulov s svetlobnim izvorom. Na grafu je prikazana porazdelitev 76 že testiranih detektorjev glede na število napak. Od tega ima pri 61 oziroma 80% detektorjev pod 2% slabih kanalov.



Slika 6.7: Rezultati testiranja 13 dvostranskih modulov. Za vsak modul je prikazano število napak na spodnjem in na zgornjem detektorju. Pri tem so napake, nastale pri sestavljanju dvojnih modulov iz enojnih obarvane rdeče. Vidimo, da so novo nastale napake redke in da se ne pojavljajo sistematično.

7. Poglavje

Zaključek

Na osnovi rezultatov elektrostatskega modela smo izdelali detektorje z $200\ \mu\text{m}$ razmikom med čitalnimi pasovi, enim interpolacijskim pasom in pasovi širine $20\ \mu\text{m}$, $40\ \mu\text{m}$ in $60\ \mu\text{m}$. Meritve so pokazale, da se lastnosti detektorjev dobro ujemajo z napovedmi (tabela 7.1). Razviti detektorji bodo vgrajeni v eksperiment DELPHI na elektronsko-pozitrskem

širina pasov	$20\ \mu\text{m}$	$40\ \mu\text{m}$	$60\ \mu\text{m}$
model	58	67	75
testni žarek	58 ± 1.5	64 ± 0.8	79 ± 1
svetlobni izvor	56 ± 3	65 ± 3	
izvor Am^{241}			76 ± 2

Tabela 7.1: Efektivnosti kapacitivnih prenosov za različne širine pasov (v %). Podane so napovedi elektrostatskega modela in rezultati meritev v testnem žarku, s svetlobnim izvorom in s fotoni iz izvora Am^{241} .

trkalniku LEP v CERN-u v pričetku leta 1996. Za vgraditev smo izbrali detektorje s pasovi širine $60\ \mu\text{m}$. Z njimi dosežemo 75%-80% prenos signala z interpolacijskih na čitalne pasove. Pri razmerju signal/šum za zadetke čitalnih pasov pri pravokotnem vpadu enako 29 to zagotavlja učinkovitost detektorja pri zadetkih interpolacijskih pasov. Krajevna ločljivost detektorjev je odvisna od vpadnega kota ionizirajočega delca in se za kote med 0° in 30° giblje med $35\ \mu\text{m}$ in $18\ \mu\text{m}$. Pri 80% do sedaj testiranih detektorjev je okvarjenih pod 2% kanalov, kar zagotavlja visok izkoristek detektorjev za sledenje delcev.

Pri detektorjih, ki bodo služili za natančno določanje točke interakcije (verteks detektor) smo analizirali odvisnostjo krajevne ločljivosti od razmerja signal/šum in od

vpadnega kota delcev. Ugotovili smo, da lahko z izbrano geometrijo detektorjev dosežemo ločljivost od $6\ \mu\text{m}$ pri pravokotnem vpadu do približno $20\ \mu\text{m}$ pri vpadnem kotu 50° , pod pogojem, da dosežemo razmerje signal/šum pri pravokotnem vpadu večje od 12. Pri tem je pri večjih vpadnih kotih ugodnejši večji razmik med pasovi. Zato bo v obročastem delu detektorja razmik med pasovi na strani n s padajočim polarnim kotom naraščal od $50\ \mu\text{m}$ pri 90° do $100\ \mu\text{m}$ oziroma $150\ \mu\text{m}$ pri 25° .

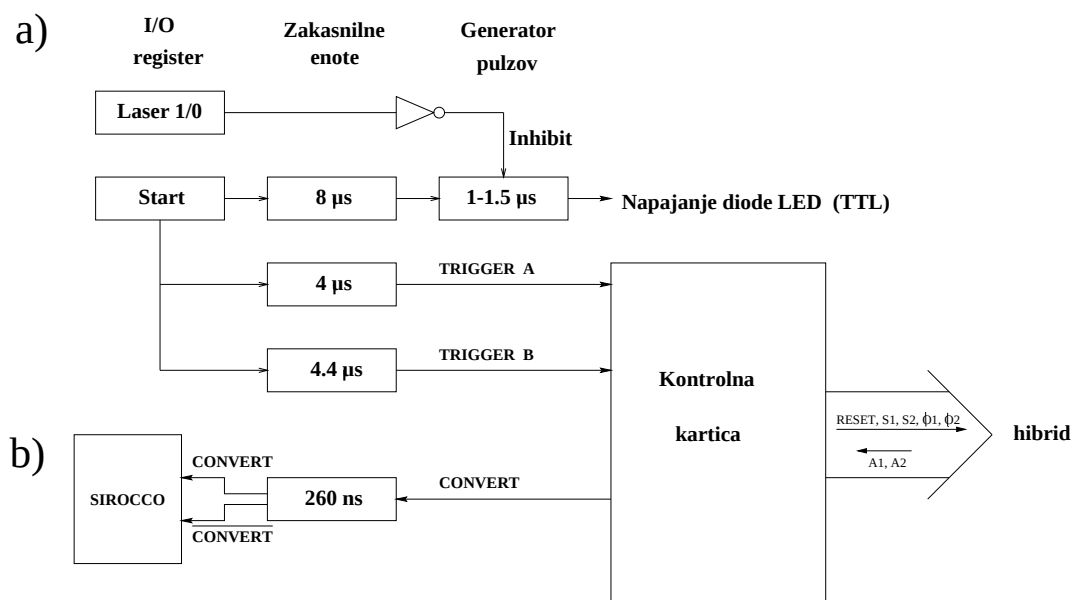
Dodatek A

Krmilno vezje sistema za testiranje detektorjev s svetlobo

Glavna komponenta krmilnega sistema je kontrolna kartica, izdelana v tehnologiji tiskane vezja. Kartica je zasnovana tako, da vhodni signal TRIGG-A sproži vzorčenje signala na detektorju (hibridu pošlje signale RESET, S1 in S2)¹. Če v času med signaloma S1 in S2 dobi signal TRIGG-B se sproži bralni cikel (ure in SHIFT-IN), sicer pa detektor zopet resetira in čaka na naslednji signal TRIGG-A. Tako zasnovana kartica omogoča delovanje sistema tako s svetlobnim izvorom, kjer trenutek ionizacije lahko izbiramo, kot tudi z radioaktivnim izvorom, kjer čas razpada lahko določimo šele nadknadno.

Krmilni sistem je z računalnikom (PC) povezan preko CAMAC I/O registra in enote, sestavljene iz NIM modulov. Zahteva po novem dogodku, ki postavi I/O register na 1, sproži enoto, sestavljeno iz NIM modulov. Ta v postavitvi s svetlobnim izvorom ustvari ustrezno sinhronizirane signale TRIGG-A, TRIGG-B in TTL pulz, ki sproži diodo. V sistemu z radioaktivnim izvorom pa ta del vsebuje diskriminator, povezan s scintilatorjem. V tem primeru I/O register sproži le TRIGG-A, TRIGG-B pa se sproži takrat, ko scintilator zazna ionizirajoč delec iz izvora. Shema tega dela sistema v postavitvi s svetlobnim izvorom je prikazana na sliki A.1.

¹Za podrobnejši opis delovanja čipa MX6 glej [8].



Slika A.1: Shema dela krmilnega sistema, sestavljenega iz NIM modulov, ki povezuje a) računalnik s krmilno kartico b) krmilno kartico z modulom SIROCCO. Prikazana je konfiguracija za delo s svetlobnim izvorom.

Dodatek B

Določanje ničelnega nivoja in šuma

Pri določanju ničelnega nivoja in šuma detektorja ločimo inicializacijo nivojev in spremljanje sprememb nivojev s časom.

Inicializacija ničelnega nivoja poteka v treh stopnjah, kjer pri vsaki povprečujemo preko večjega števila dogodkov. Kot kompromis med hitrostjo in natančnostjo to število običajno nastavimo na 50.

V prvi stopnji inicializacije določimo povprečno višino nivoja in povprečen kvadrat odmika (RMS) za vsak pas posebej,

$$PED_i = \langle PH_i \rangle \quad (B.1)$$

$$NOI_i = \sqrt{\langle PH_i^2 \rangle - \langle PH_i \rangle^2} , \quad (B.2)$$

kjer $\langle \rangle$ pomeni povprečevanje po dogodkih. Tu sta PED_i in NOI_i ničelni nivo in šum i -tega pasu. Pri tem označimo kanale, kjer je povprečen kvadrat odmika bistveno manjši kot pri ostalih (mrtvi kanali). V drugi stopnji proces ponovimo (enačbi B.1, B.2), vendar pri vsakem pasu upoštevamo le dogodke k , za katere je razlika med signalom in ničelnim nivojem manjše od trikratnega povprečnega odmika (RMS)

$$PH_i(k) - PED_i < 3 NOI_i . \quad (B.3)$$

Tretja stopnja je namenjena natančnemu določevanju šuma. V osnovi je enaka drugi stopnji, le da pri vsakem dogodku odštejemo še povprečen premik nivoja posameznega čipa

$$CM_{cip}(n) = \frac{1}{N_{cip}} \sum_{i=1}^{N_{cip}} [PH_i(n) - PED_i] \quad N_{cip} = 128 \quad (B.4)$$

$$NOI_i = \sqrt{\langle (PH_i - PED_i - CM_{cip})^2 \rangle} . \quad (B.5)$$

Pri sledenju spreminjanja ničelnega nivoja je pomembno, da spremembam sledimo dovolj hitro, a da nas ne zmoti signal ionizirajočega delca. To dosežemo tako, da po vsakem dogodku določimo novi ničelni nivo kot uteženo povprečje starega nivoja in nivoja pri danem dogodku

$$PED_i(n+1) = (1-w) \cdot PED_i(n) + w \cdot PH_i(n+1) , \quad (B.6)$$

kjer je $PED_i(n)$ višina ničelnega nivoja na dogodku n in $PH_i(n)$ nivo i -tega pasu v n -tem dogodku. Za utež w običajno izberemo vrednost $w = 1/50$.

Literatura

- [1] The DELPHI Collaboration, Proposal for the Upgrade of DELPHI in the Forward Region, DELPHI 92-142 GEN 135, 16. Oct. 1992
- [2] The DELPHI Collaboration, Proposal for the DELPHI Very Forward Tracker, DELPHI 93-52 GEN 146, 15. May 1993
- [3] A. Peisert: Instrumentation in High Energy Physics, uredil F. Sauli, World Scientific Publishing, 1992
- [4] U. Kötz et al.: Nucl. Instr. and Meth. A235 (1985) 481-487
- [5] G.A. Erskine: CERN Program Library, F010 (1984)
- [6] R. Sonnenblick et al.: Nucl. Instr. and Meth. A310 (1991) 189-191
- [7] I. Hirokazu, M. Tanaka, S. Okuno: Nucl. Instr. and Meth. A313 (1992) 31-36
- [8] J.C. Stanton, N. Kurtz: RAL-89-028, Apr 1989
J.C. Stanton: IEEE Trans. Nucl. Sci. 3 (1990) 522.
- [9] A. Lang, J.P. Vanuxem: EP-Electronics note 90-01 (1990)
- [10] H. Dijkstra, J.J. Gomez-Cadenas, J.A. Hernando, C. Troncon, D. Žontar: DELPHI 94-50 TRACK 79 Rev. (1994)